

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Pokročilá měření na hybridní fotonické síti
Advanced Measurement Hybrid Photonic Network**

2016

Bc. Zdeněk Wilček

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zdeněk Wilček**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Pokročilá měření na hybridní fotonické síti**
Advanced Measurement Hybrid Photonic Network

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je studium zcela nových typů hybridních fotonických sítí založených na vlnovém dělení xWDM. Takto unikátní sítě jsou v dnešní době hojně vyhledávány telekomunikačními operátory z důvodu zvýšení šířky pásma a kapacity sítě bez nutnosti velkých investic do sítě v podobě kapitálových nákladů (CAPEX). Rovněž je dosaženo snížení operačních nákladů (OPEX) díky podvědomí správců sítí, jelikož se jedná o využití stávajících technologií, avšak jiným způsobem zapojených ve funkční celek. Student provede na zhotovené topologii základní měření výkonu, útlumu, disperzí. Krom toho, bude mít student za úkol i implementovat polovodičové zesilovače a testovat maximální dosah optické sítě. Nedílnou součástí dané diplomové práce je i proměření integrity na různých typech topologií pomocí měření testů RFC 2544 a ITU-T Y.1564.

1. Proved'te studium hybridních fotonických sítí z dosud známých poznatků.
2. Zhotovte za pomoci softwarové aplikace Optiwave OptiSystem simulaci hybridní fotonické sítě.
3. Realizujte zapojení hybridní fotonické sítě v rámci laboratoře a proved'te měření.
4. Porovnejte dosažené simulované výsledky s reálně naměřenou a navrženou hybridní fotonickou sítí.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [3] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [4] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062
- [5] PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.
- [6] BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications (The Artech House Optoelectronics Library)*, Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- [7] SHIMADA, S., Ishio, H. *Optical Amplifiers and their Applications*, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 p. ISBN 978-0471940050.
- [8] LEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected Topics in Electronics and Systems)*. World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.

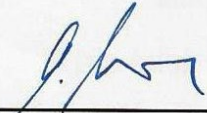
- [9] DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
[10] NEMOVA, G. *Optical Amplifiers (Physics Research and Technology)*. Nova Biomedical Books, 2011.
337 s. ISBN 978-1612098357.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 29. dubna 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Uilata', written over a dotted line.

podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Bc. Michalovi Tkáčikovi za spolupráci při praktické části diplomové práce a rodině, která mi při vypracování byla oporou. A samozřejmě Ing. Janu Látalovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce s názvem Pokročilá měření na hybridní fotonické síti je rozčleněna na teoretickou a praktickou část. Na začátku teoretické části pojednává o optických zesilovačích. Druhá kapitola popisuje prvky WDM systémů. Následuje kapitola o technologii WDM-PON a závěr teoretické části se zaměřuje na hybridní PON systémy.

V praktické části je provedeno testování polovodičových zesilovačů a vytvoření hybridní fotonické sítě obsahující polovodičové zesilovače. Měření integrity hybridní sítě. Závěrečná část se zabývá vytvořením reálné topologie WDM-PON systému v aplikaci Optiwave OptiSystem 14 a následném porovnání.

Klíčová slova

SOA, WDM-PON, AWG, EPON, Optiwave OptiSystem

Abstract

My diploma thesis entitled Advanced Measurement Hybrid Photonic Network is divided into two parts - theoretical and practical. The beginning of the theoretical part is dedicated to optical amplifiers. The second chapter describes components of WDM systems. The following chapter describes WDM-PON technology and the conclusion of theoretical part focuses on Hybrid PON networks.

The practical part is about testing semiconductor amplifiers and create hybrid photonic network comprising semiconductor optical amplifiers. Testing of integrity hybrid photonic network. Last part of the thesis deal conversion of real WDM-PON system into the simulations in Optiwave OptiSystem.

Key words

SOA, WDM-PON, AWG, EPON, Optiwave OptiSystem

Obsah

Seznam použitých zkratk	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek	- 13 -
Úvod	- 19 -
1 Optické zesilovače	- 20 -
1.1 Klasifikace zesilovačů	- 20 -
1.2 Vlastnosti zesilovačů	- 21 -
1.2.1 Šum zesilovače	- 21 -
1.3 Vláknový zesilovač	- 22 -
1.4 Polovodičové optické zesilovače	- 24 -
1.4.1 Typy SOA zesilovačů	- 24 -
1.4.2 RSOA	- 26 -
2 Prvky WDM systémů	- 27 -
2.1 AWG	- 27 -
2.1.1 Princip činnosti AWG	- 27 -
2.2 Přijímače ve WDM systémech	- 29 -
2.2.1 PIN fotodiody	- 29 -
2.2.2 Lavinové fotodiody	- 31 -
2.3 Vysílače ve WDM systémech	- 33 -
2.3.1 Fabry-Perotovy laserové diody	- 33 -
2.3.2 DFB a DBR laserové diody	- 33 -
2.3.3 VCSEL	- 33 -
2.3.4 Laditelné laserové diody	- 34 -
3 Technologie WDM-PON	- 36 -
3.1 WDM-PON s fixními nebo laditelnými vysílači	- 36 -
3.2 WDM-PON s výkonovými rozbočovači v RN	- 37 -
3.3 Princip ECC v WDM-PON	- 38 -
3.4 WDM-PON s částečným reflektorem v RN	- 38 -
3.5 Cyklické AWG ve WDM-PON	- 39 -
3.6 Rozšíření počtu kanálů ve WDM-PON	- 40 -
4 Vývoj sítí nových generací	- 42 -
4.1 Dnešní FTTH sítě	- 42 -

4.2	WDM-PON	- 43 -
4.3	TWDM-PON architektury	- 43 -
4.3.1	Může TWDM-PON být rentabilní?	- 44 -
4.3.2	Vyhlídka pro PON systémy nové generace	- 45 -
4.3.3	Role nových aplikací	- 45 -
4.4	Hybrid PON	- 45 -
4.4.1	MSD-WDM-PON	- 46 -
4.4.2	SSD-WDM-PON.....	- 47 -
4.4.3	WA-PON	- 47 -
4.5	Hybridní síť SUCCESS a její architektura.....	- 48 -
4.6	SARDANA	- 49 -
5	Infrastruktura laboratoře.....	- 51 -
5.1	Aktivní prvky hybridní fotonické sítě.....	- 51 -
5.1.1	Technologie EPON2.....	- 51 -
5.1.2	Technologie WDM-PON	- 53 -
5.2	Pasivní prvky a optické trasy.....	- 55 -
5.2.1	Realizace propojení laboratoří	- 55 -
5.2.2	Měření útlumových bilancí pasivních prvků.....	- 55 -
5.2.3	Měření PMD a CD	- 57 -
5.2.4	Pásmové děliče a optické cirkulátory	- 58 -
5.3	Měřicí přístroje a zařízení	- 59 -
5.3.1	EXFO FTB-500	- 59 -
5.3.2	EXFO FTB-1.....	- 61 -
5.3.3	AXS-200/850	- 61 -
5.3.4	OSA 20	- 62 -
6	Testování polovodičových zesilovačů.....	- 63 -
6.1	SOA zesilovače v C a L pásmu	- 63 -
6.1.1	Experimentální pracoviště s širokopásmovým zdrojem	- 63 -
6.1.2	Polovodičový zesilovače BOA 1080P	- 64 -
6.1.3	Polovodičový zesilovače SOA 1117P	- 65 -
6.1.4	Komparace zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P	- 66 -
6.2	Nasazení zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P do DWDM-PON sítě.....	- 67 -
6.2.1	Topologie testované DWDM-PON sítě.....	- 67 -

6.2.2	DWDM-PON síť se SOA zesilovači a cirkulátory	- 71 -
6.2.3	Sériové zapojení SOA zesilovačů v DWDM-PON síti	- 74 -
6.3	SOA zesilovač v S pásmu	- 78 -
6.3.1	SASH 24P151	- 78 -
7	Testování integrity hybridní fotonické sítě	- 80 -
7.1	Topologie hybridní fotonické sítě	- 80 -
7.2	Metodika testování integrity hybridní fotonické sítě	- 81 -
7.2.1	Postup testování technologie WDM-PON	- 81 -
7.2.2	Postup testování technologie EPON2	- 82 -
7.3	Testování stavu konektivity a určení testované EARU jednotky	- 82 -
7.4	Testování integrity pomocí test ITU-T Y.1564	- 85 -
7.5	Testování integrity pomocí test ITU-T RFC 2544	- 86 -
8	Simulační část	- 87 -
8.1	Rozbor hybridní sítě v simulačním prostředí	- 87 -
8.1.1	Technologie EPON2 v Optiwave OptiSystem	- 88 -
8.1.2	Technologie WDM-PON v Optiwave OptiSystem	- 89 -
8.1.3	SOA zesilovače v Optiwave OptiSystem	- 91 -
8.2	Měření hybridní fotonické sítě v simulačním prostředí	- 92 -
8.3	Spektrální charakteristiky v Optiwave Optisystem	- 95 -
	Závěr	- 97 -
	Použitá literatura	- 99 -
	Seznam příloh	- 101 -

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
APD	Avalanche Photodiode
AWG	Array Waveguide Grating
BLS	Broadband Light Source
CW	Continual Wave
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
DSL	Digital Subscribe Line
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
EARU	Ethernet Access Residential Unit
ECC	Embended Communication Channel
EMS	Elements Management System
EPON	Ethernet Passive Optical Network
XG-PON	X Generation - Passive Optical Network
FP-LD	Fabry Perot Laser Diode
FTTH	Fiber-to-the Home
Ge	Germanium
IL	Interleaver
MC	Management Card)
ODN	Optical Distribute Network)
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
PI	PON Interface
PIC	Photonic Integrated Circuits)
SAN	Storage Area Networking)
SI	Service Interface
SNR -	Signal to noise ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SW/NI	Switch and Network Interface
TDM	Time Division Multiplexing

Seznam použitých zkratek

TW-SOA	Trawelling Wave-SOA
TX	Tranciever
VoIP	Voice over Internet Protocol

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
Obrázek 1.1	<i>In-line zesilovač [20]</i>	- 20 -
Obrázek 1.2	<i>Předzesilovač[20]</i>	- 20 -
Obrázek 1.3	<i>Výkonový zesilovač [20]</i>	- 20 -
Obrázek 1.4	<i>Schematické znázornění EDFA zesilovače[20]</i>	- 22 -
Obrázek 1.5	<i>Proces zesílení v EDFA zesilovači použitím tří úrovněvého modelu [20]</i>	- 23 -
Obrázek 1.6	<i>Příklad dotace pro tří-úrovňový model [20]</i>	- 23 -
Obrázek 1.7	<i>Konfigurace SOA zesilovače [20]</i>	- 24 -
Obrázek 1.8	<i>Typy SOA zesilovačů: (a) FP-SOA; (b) TW-SOA [20]</i>	- 25 -
Obrázek 1.9	<i>Základní model Fabry-Perotova zesilovače[20].</i>	- 26 -
Obrázek 2.1	<i>N:M AWG jako konvertor mezi sloupci a řadami[8]</i>	- 27 -
Obrázek 2.2	<i>Číslování vstupních/výstupních vláken a pole vlnovodů v AWG[8]</i>	- 27 -
Obrázek 2.3	<i>Spektrální citlivost Ge a InGaAs fotodiod [8]</i>	- 30 -
Obrázek 2.4	<i>Přijímač fotodiody (vlevo) a odpovídající obvod (vpravo)[8]</i>	- 30 -
Obrázek 2.5	<i>Struktura APD a síla elektrického pole podél její struktury[8]</i>	- 31 -
Obrázek 2.6	<i>Struktura InP/InGaAs APD [8]</i>	- 31 -
Obrázek 3.1	<i>Obecný typ WDM-PON s fixními nebo laditelnými vysílači v laserovém poli v OLT jednotce a laditelné lasery v ONU jednotkách [18]</i>	- 36 -
Obrázek 3.2	<i>WDM-PON s laditelnými lasery v ONU podporující výkonový dělič ODN [18]</i>	- 37 -
Obrázek 3.3	<i>Ladění ONU prostřednictvím uzavřené smyčky zahrnující OLT a ECC [18]</i>	- 38 -
Obrázek 3.4	<i>Ladění ONU prostřednictvím uzavřené smyčky zahrnující částečný reflektor v RN [18]</i>	- 39 -
Obrázek 3.5	<i>Cyklické AWG [18]</i>	- 39 -
Obrázek 3.6	<i>DS a US frekvenční dělení v ONU jednotce [18]</i>	- 40 -
Obrázek 3.7	<i>WDM-PON založená na laserech s 25 GHz roztečí pro rozšíření počtu kanálů [18]</i>	- 40 -
Obrázek 3.8	<i>WDM-PON založená na laserech s 25 GHz roztečí a S pásmem pro rozšíření vysokého počtu kanálů [18]</i>	- 41 -
Obrázek 4.1	<i>Vzestupné datové kanály v MSD-WDM-PON</i>	- 46 -

Obrázek 4.2	<i>Vzestupné datové kanály v SSD-WDM-PON</i>	- 47 -
Obrázek 4.3	<i>Vzestupné datové kanály ve WA-PON</i>	- 48 -
Obrázek 4.4	<i>Architektura SUCCESS [19]</i>	- 49 -
Obrázek 4.5	<i>Architektura SARDANA[2]</i>	- 50 -
Obrázek 5.1	<i>Karta EPON2</i>	- 52 -
Obrázek 5.2	<i>Karta PI WDM-PON systému</i>	- 54 -
Obrázek 5.3	<i>AWG - WPF 1132c</i>	- 55 -
Obrázek 5.4	<i>Reflektogram 5 km dlouhé optické trasy</i>	- 57 -
Obrázek 5.5	<i>Reflektogram 50 km dlouhé optické trasy</i>	- 57 -
Obrázek 5.6	<i>FTB-500</i>	- 59 -
Obrázek 5.7	<i>FTB-1</i>	- 61 -
Obrázek 5.8	<i>AXS-200/850</i>	- 61 -
Obrázek 5.9	<i>OSA 20</i>	- 62 -
Obrázek 6.1	<i>Zapojení zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P v přímém směru</i>	- 63 -
Obrázek 6.2	<i>Zapojení zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P v nepřímém směru</i>	- 64 -
Obrázek 6.3	<i>Spektrum zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem BOA 1080P v přímém směru</i>	- 64 -
Obrázek 6.4	<i>Přiblížení optického spektra zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem BOA 1080P v přímém a nepřímém směru pro vstupní proudy 600 mA a 300 mA</i>	- 64 -
Obrázek 6.5	<i>Spektrum zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem SOA 1117P v přímém směru</i>	- 65 -
Obrázek 6.6	<i>Přiblížení optického spektra zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem SOA 1117P v závislosti na směru zapojení pro vstupní proudy 500 mA a 300 mA</i>	- 66 -
Obrázek 6.7	<i>Spektrální charakteristiky zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P při maximálním operačním proudu</i>	- 67 -
Obrázek 6.8	<i>Topologie referenčního měření DWDM-PON sítě</i>	- 67 -
Obrázek 6.9	<i>Topologie DWDM-PON sítě s nasazeným zesilovačem v přímém směru pro sestupný provoz</i>	- 68 -
Obrázek 6.10	<i>Spektrum zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém směru zapojení</i>	- 68 -
Obrázek 6.11	<i>Spektrum zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém směru zapojení</i>	- 69 -
Obrázek 6.12	<i>Spektrum zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém směru zapojení ve vzestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému</i>	- 70 -

Obrázek 6.13	<i>Spektrum zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém směru zapojení ve vzestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému</i>	- 71 -
Obrázek 6.14	<i>Topologie referenčního měření DWDM-PON sítě s cirkulátory</i>	- 72 -
Obrázek 6.15	<i>Topologie spektrálního měření DWDM-PON sítě se SOA zesilovači a cirkulátory</i>	- 72 -
Obrázek 6.16	<i>Spektrum zesilovače BOA 1080P v přímém směru zapojení v sestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému</i>	- 72 -
Obrázek 6.17	<i>Spektrum zesilovače SOA 1117P v přímém směru zapojení ve vzestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému</i>	- 73 -
Obrázek 6.18	<i>Topologie 1 DWDM-PON sítě se sériovým zapojením SOA zesilovačů</i>	- 74 -
Obrázek 6.19	<i>Topologie 2 DWDM-PON sítě se sériovým zapojením SOA zesilovačů</i>	- 74 -
Obrázek 6.20	<i>Spektrum topologie 1 v sestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače SOA 1117P</i>	- 75 -
Obrázek 6.21	<i>Spektrum topologie 1 v sestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače BOA 1080P</i>	- 75 -
Obrázek 6.22	<i>Spektrum topologie 2 v sestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače SOA 1117P</i>	- 76 -
Obrázek 6.23	<i>Spektrum topologie 2 v sestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače BOA 1080P</i>	- 76 -
Obrázek 6.24	<i>Spektrum topologie 1 ve vzestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače SOA 1117P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače BOA 1080P</i>	- 77 -
Obrázek 6.25	<i>Spektrum topologie 1 ve vzestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače BOA 1080P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače SOA 1117P</i>	- 77 -
Obrázek 6.26	<i>Spektrum topologie 2 ve vzestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače SOA 1117P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače BOA 1080P</i>	- 78 -
Obrázek 6.27	<i>Spektrum topologie 1 ve vzestupném směru při max. hodnotě IOP zesilovače BOA 1080P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače SOA 1117P</i>	- 78 -
Obrázek 6.28	<i>Topologie testování zesilovače AEON SASH 24P151</i>	- 79 -
Obrázek 7.1	<i>Topologie hybridní fotonické sítě</i>	- 80 -
Obrázek 7.2	<i>Vzestupný směr, kombinace 5+45 km a 10+40 km</i>	- 84 -
Obrázek 7.3	<i>Sestupný směr, kombinace 5+45 km a 10+40 km</i>	- 84 -
Obrázek 7.4	<i>Vzestupný směr, kombinace 10+35 km</i>	- 84 -

Obrázek 7.5	<i>ITU-T Y.1564 - EARU - Konfigurační test - Ztrátovost rámců - 5+25 km</i>	- 85 -
Obrázek 8.1	<i>Topologie hybridní fotonické sítě</i>	- 87 -
Obrázek 8.2	<i>OLT jednotka iMAP 9102</i>	- 88 -
Obrázek 8.3	<i>ONU jednotka AT-ON 1000</i>	- 88 -
Obrázek 8.4	<i>OLT jednotka EAST 1100</i>	- 89 -
Obrázek 8.5	<i>Přijímací část OTL jednotky EAST 1100</i>	- 90 -
Obrázek 8.6	<i>Přijímací část OTL jednotky EAST 1100</i>	- 90 -
Obrázek 8.7	<i>FP laserová dioda v OLT jednotce</i>	- 91 -
Obrázek 8.8	<i>EARU jednotka 1112</i>	- 91 -
Obrázek 8.9	<i>Struktura SOA zesilovačů a tras optických vláken</i>	- 92 -
Obrázek 8.10	<i>Hodnoty BER v logaritmickém vyjádření pro kombinace délek optických tras</i>	- 92 -
Obrázek 8.11	<i>Hodnoty BER v logaritmické vyjádření pro kombinace délek optických tras</i>	- 93 -
Obrázek 8.12	<i>Diagram OKA; EARU ch 2, (a) 5+10km; (b) 5+25 km; (c) 5+45 km</i>	- 93 -
Obrázek 8.13	<i>Diagram OKA; EARU ch 12, (a) 5+10km; (b) 10+5 km; (c) 15+5 km; (d) 20+5 km</i>	- 94 -
Obrázek 8.14	<i>Sestupný směr; Pozice "A"</i>	- 95 -
Obrázek 8.15	<i>Sestupný směr; Pozice "B"; Kombinace 5+25 km</i>	- 95 -
Obrázek 8.16	<i>Vzestupný směr; Pozice "A"; Kombinace 5+25 km</i>	- 95 -

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
Tabulka 1.1	<i>Vlastnosti zesilovačů EDFA a SOA [20]</i>	- 21 -
Tabulka 1.2	<i>Základní parametry SOA zesilovačů [20]</i>	- 25 -
Tabulka 2.1	<i>Experimentální parametry AWG [8]</i>	- 29 -
Tabulka 2.2	<i>Porovnání PIN a APD [8]</i>	- 32 -
Tabulka 5.1	<i>SFP modul standardu EPON2 a jeho parametry[7]</i>	- 51 -
Tabulka 5.2	<i>Optické parametry AT-ON 1000 [1]</i>	- 53 -
Tabulka 5.3	<i>Příspěvkové kanály WDM-PON sítě</i>	- 54 -
Tabulka 5.4	<i>Vložený útlum optických pasivních rozbočovačů včetně označení portů v OPP4</i>	- 56 -

Tabulka 5.5	<i>Úseky optické trasy včetně označení portů v OPP3</i>	- 56 -
Tabulka 5.6	<i>Měření úseků optické trasy z pohledu vyhodnocení PMD</i>	- 58 -
Tabulka 5.7	<i>Měření úseků optické trasy z pohledu vyhodnocení CD</i>	- 58 -
Tabulka 5.8	<i>Parametry pásmových děličů</i>	- 58 -
Tabulka 5.9	<i>Parametry optických cirkulátorů</i>	- 59 -
Tabulka 5.10	<i>Vybrané parametry modulu FTB-5240BP</i>	- 60 -
Tabulka 5.11	<i>Vybrané parametry modulu FTB-5500B</i>	- 60 -
Tabulka 5.12	<i>Vybrané parametry modulu FTB-5800</i>	- 60 -
Tabulka 5.13	<i>Vybrané parametry spektrálního analyzátoru OSA 20[22] [23]</i>	- 62 -
Tabulka 6.1	<i>Testované optické zesilovače a základní parametry</i>	- 63 -
Tabulka 6.2	<i>Vybrané parametry SOA zesilovačů</i>	- 63 -
Tabulka 6.3	<i>Zisk zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů</i>	- 65 -
Tabulka 6.4	<i>Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů</i>	- 66 -
Tabulka 6.5	<i>Zisk zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P v závislosti na DWDM kanálu v přímém směru</i>	- 67 -
Tabulka 6.6	<i>Zisk zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému</i>	- 69 -
Tabulka 6.7	<i>Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému</i>	- 70 -
Tabulka 6.8	<i>Komparace zisků zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému</i>	- 70 -
Tabulka 6.9	<i>Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému</i>	- 71 -
Tabulka 6.10	<i>Zisk zesilovače BOA 1080P v přímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému</i>	- 73 -
Tabulka 6.11	<i>Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému</i>	- 73 -
Tabulka 6.12	<i>Kombinace pořadí a směru zapojení zesilovačů v topologiích 1 a 2</i>	- 74 -
Tabulka 6.13	<i>Hodnoty zisků kanálů při různých kombinacích operačních proudů zesilovačů v topol. 1</i>	- 75 -
Tabulka 6.14	<i>Hodnoty zisku kanálů při různých kombinacích operačních proudů zesilovačů v topologii 2</i>	- 76 -

Tabulka 6.15	<i>Zisk zesilovače AEON SASH24P151 v závislosti na vstupním výkonu</i>	- 79 -
Tabulka 7.1	<i>Kombinace optických tras</i>	- 81 -
Tabulka 7.2	<i>Stav spojení koncových jednotek - Pozice A: 5 km</i>	- 82 -
Tabulka 7.3	<i>Stav spojení koncových jednotek – Pozice A: 10 km</i>	- 83 -
Tabulka 7.4	<i>Stav spojení koncových jednotek – Pozice A: 15 km</i>	- 83 -
Tabulka 7.5	<i>Stav spojení koncových jednotek – Pozice A: 20 km</i>	- 83 -
Tabulka 7.6	<i>Provozní vlastnosti podle třídy služeb - Metro ethernet [24]</i>	- 85 -
Tabulka 7.7	<i>RFC 2544</i>	- 86 -
Tabulka 8.1	<i>Globální parametry</i>	- 88 -
Tabulka 8.2	<i>Parametry technologie EPON</i>	- 89 -
Tabulka 8.3	<i>Kombinace trasy – A:5 km (vlevo); A:10 km (vpravo)</i>	- 93 -
Tabulka 8.3	<i>Kombinace trasy – A:5 km (vlevo); A:10 km (vpravo)</i>	- 93 -

Úvod

Diplomová práce navazuje na mou bakalářskou práci s názvem Měření a testování integrované vláknově optické sítě. Práce se zaměřuje na studium hybridních sítí jenž se stávají stále více aktuálními v kontextu přístupových sítí. Diplomová práce byla provedena na technologiích EPON2 a WDM-PON, které se nachází na Katedře telekomunikační techniky Vysoké školy báňské.

Práce je rozdělena na dvě části, první teoretická část pojednává o optických zesilovačích a jejich umístění v optických sítích. Dále jsou zde uvedeny dvě hlavní kategorie optických zesilovačů. Jedná se o polovodičové optické zesilovače SOA a vláknové optické zesilovače, konkrétně EDFA zesilovač. Lehce je také nastíněna problematika RSOA zesilovačů.

V další části teoretické práce je věnována pozornost prvkům využívajících se ve WDM systémech, konkrétně např. AWG směrová odbočnice a její princip činnosti, či typy využívaných přijímačů a vysílačů. Ve třetí a čtvrté kapitole teoretické části je proved rozbor několika typů WDM-PON systémů využívající různých prvků v distribuční síti za účelem efektivního a rentabilního nasazení do praxe a v poslední kapitole teoretické části je uvedena studie hybridních sítí.

V druhé části diplomové práce je kladen důraz na realizaci hybridní fotonické sítě v laboratoři, přičemž v první části je proved rozbor použitých technologií a popis infrastruktury laboratoře včetně využívaných měřicích přístrojů a zařízení.

Následuje popis experimentálního testování polovodičových zesilovačů, jenž byly podrobeny testování v experimentálních topologiích za účelem ověření funkčnosti a získání informací, která jsou dále využít při výstavbě hybridní fotonické sítě.

Po experimentálním testování SOA zesilovačů následuje samotná implementace těchto zesilovačů do reálné hybridní fotonické sítě, kde probíhá testování integrity v podobě testů RFC2544 a ITU-T Y.1564, včetně spektrální analýzy jak ve vzestupném, tak i v sestupném směru přenosu této hybridní fotonické sítě.

Součástí praktické části je vytvoření v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem na základě změřených dat, co nejreálnější podobu hybridní fotonické sítě vybudované v laboratoři a následně provést porovnání dosažených výsledků v reálné topologii vůči simulaci. Veškeré praktické měření je realizováno na půdě budovy Nová FEI v laboratoři PorEB316.

1 Optické zesilovače

Šířením signálů v optických systémech jsou tyto signály utlumovány a po určité vzdálenosti ztratí svou výkonovou úroveň natolik, že již není možné přijatý signál přijímačem zpracovat. Jedna z možností předejít těmto stavům je použití optických zesilovačů, které jsou schopny zvýšit amplitudu přenášeného optického signálu. Optické zesilovače jsou zařízení, které jsou schopné přes několik kanálů v optickém vlákne zesílit optický signál, a tím kompenzovat vzniklý útlum. Signály jsou také zkreslené a obsahují šum, což optické zesilovače nejsou schopny odstranit.

1.1 Klasifikace zesilovačů

Základní typy zesilovačů dle umístění v optickém přenosovém řetězci:

1. In-line zesilovače pro zesílení výkonu.
2. Předzesilovač ke zvýšení přijaté výkonu v přijímači.
3. Výkonový zesilovač ke zvýšení vysílaného výkonu.
4. Výkonový zesilovač v lokální síti.



Obrázek 1.1: *In-line zesilovač [20]*



Obrázek 1.2: *Předzesilovač[20]*



Obrázek 1.3: *Výkonový zesilovač [20]*

Hlavní typy optických zesilovačů dle principu zesílení:

1. Vláknově dopované zesilovače.
2. Ramanův a Brillouinův zesilovač.
3. Polovodičové optické zesilovače .

Obecné vlastnosti zesilovačů:

1. Vznik inverze populace znamenající přesun více atomů a molekul do vyšší energetické hladiny.
2. Vznik stimulované emise působením vstupních pulzů signálů.
3. Hodnota saturačního výkonu způsobující přechod zesilovače do saturevaného stavu.
4. Generování šumu zesilovačem.

Tabulka 1.1 Vlastnosti zesilovačů EDFA a SOA [20]

Vlastnosti zesilovačů	EDFA	SOA
Aktivní medium	Er ³⁺ iont v oxidu křemičitém	Páry elektron-díra v polovodičích
Délka	Několik metrů	500 μm
Čerpací zdroj	Optický	Elektrický
Zisk ve spektru	1,5–1,6 μm	1,3–1,5 μm
Šířka pásma zisku	24–35 nm	100 nm
Doba uvolnění	0,1–1 ms	<10–100 ps
Maximální zisk	3–50 dB	25–30 dB
Saturační výkon	>10 dBm	0–10 dBm
Polarizačně závislé	Ne	Ano
Šumové číslo	3–4 dB	6–8 dB
Vložný útlum	<1 dB	4–6 dB
Integrovatelnost	Ne	Ano

1.2 Vlastnosti zesilovačů

Zesílení v optických zesilovačích je pomocí stimulované emise, přičemž stejný princip je využíván v laserech. Lze tedy uvažovat o podobných charakteristických parametrech, jako jsou zisk, spektrum, šířka pásma apod. Důležitým parametrem zesilovačů je šum generovaný samotným zesilovačem.

1.2.1 Šum zesilovače

Odstup signálu od šumu SNR u optických zesilovačů je degradován, a to díky spontánní emisi, jenž přidává k signálu během jeho zesílení šum. Tento šum je definován vztahem:

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}}. \quad (1.1)$$

SNR se týká elektrického výkonu generovaného, když je signál přeměněn na elektrický proud použitím fotodetektoru. Modelujeme F_n vzhledem k ideálnímu detektoru omezeného pouze výstřelovým šumem:

$$(SNR)_{in} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2}, \quad (1.2)$$

kde $\langle I \rangle = RP_{in}$, je průměrný fotoproud $R = \frac{q}{h\nu}$ je citlivost ideálního detektoru s jednotkovou kvantovou účinností, $\sigma_s^2 = 2q(RP_{in})\Delta f$ je odchylka od výstřelového šumu a Δf je šířka pásma detektoru. Na výstupu je přidán šum vzniklý spontánní emisí přijímače:

$$S_{sp}(\nu) = (G - 1)n_{sp}h\nu. \quad (1.3)$$

Zde S_{sp} vyjadřuje spektrální hustotu šumu vyvolaného spontánní emisí, ν je optická frekvence a n_{sp} je faktor spontánní emise neboli faktor inverze populace. Hodnota n_{sp} je pro zesilovače

s kompletní inverzí populace rovná $n_{sp} = 1$ (všechny atomy jsou ve vyšší energetické hladině) a $n_{sp} > 1$ pro neúplnou inverzi populace. Pro dvouúrovňové systémy platí následující rovnice:

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}, \quad (1.4)$$

kde N_1 a N_2 jsou atomové populace v nejnižších a nejvyšších stavech. Celková odchylka výstřelového šumu a šumu spontánní emise je poté daná vztahem

$$\sigma^2 = 2q(RGP_{in})\Delta f + 4(RGP_{in})(RS_{sp})\Delta f. \quad (1.5)$$

Všechny další příspěvky na šumu přijímače jsou zanedbatelné. Na výstupu je SNR zesíleného signálu dané vztahem

$$(\text{SNR})_{\text{out}} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma^2} = \frac{(RGP_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{GP_{in}}{4S_{sp}\Delta f} \quad (1.6)$$

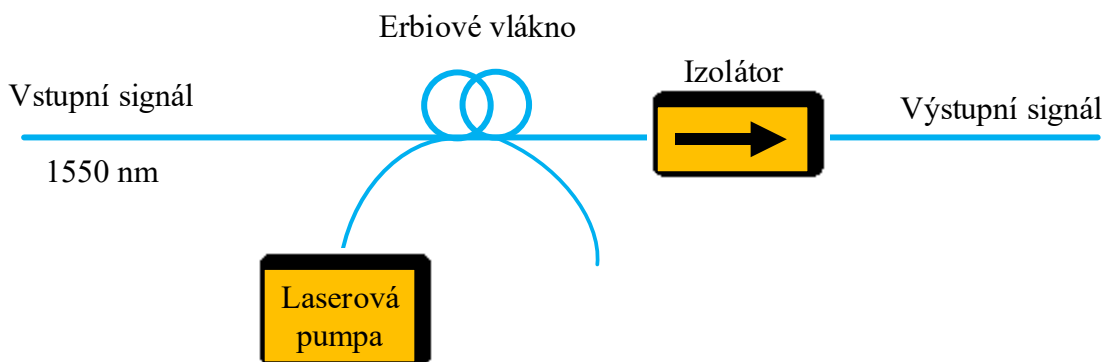
za předpokladu, že $G \gg 1$ a zanedbání prvního členu ve vzorci 2.5 použitím definice F_n , lze získat

$$F_n = 2n_{sp} \frac{G-1}{G} \approx 2n_{sp} \quad (1.7)$$

To ukazuje, že i pro ideální zesilovač ($n_{sp} = 1$) zesílený signál je degradován faktorem 2 (3dB). V praxi se hodnota F_n pohybuje v rozsahu 6 až 8 dB.

1.3 Vláknový zesilovač

Optický vláknový zesilovač EFDA je tvořen optickým vláknem, kde k samotnému procesu zesílení optického signálu dochází ve vlákně, které je dopované vzácnými prvky a systémem čerpacího zdroje, který dodává energii do optického vlákna, čímž dochází k zesílení, viz obrázek 1.4. Čerpací zdroj je obvykle složen z polovodičového laseru a optického vazebního členu, jenž slouží pro navázání čerpacího záření do optického vlákna, což způsobí zesílení vstupního signálu.

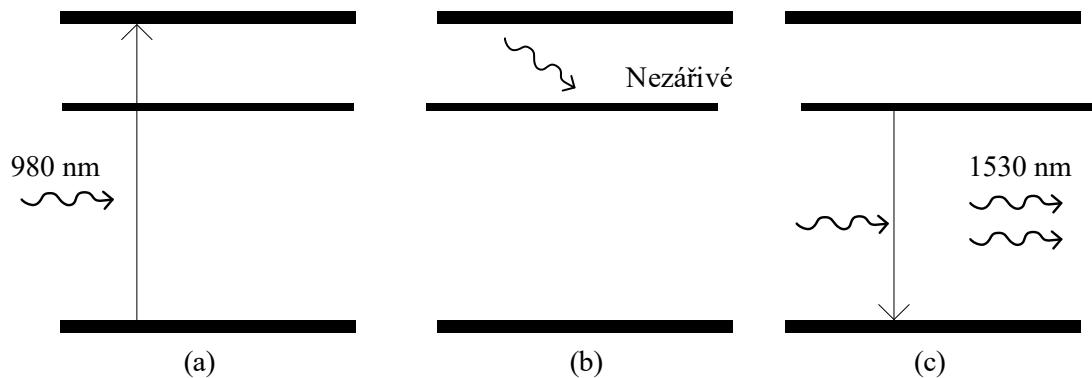


Obrázek 1.4: Schematické znázornění EDFA zesilovače[20]

Erbiem dotované zesilovače jsou vyráběny, jak již je z názvu zřejmé, dopováním optického vlákna erbiem, jenž v kombinaci s čerpacím zdrojem váže dopanty erbia do vyšších energetických hladin. Energie je následně postupně přeměněna do optického signálu procházející skrz vláknový

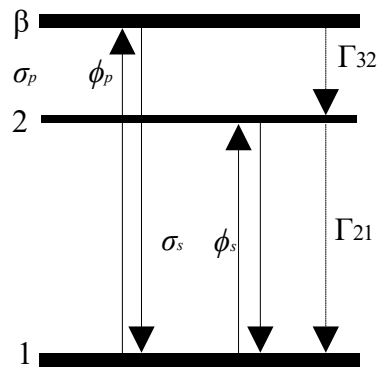
segment vystavený buzení, což vede k zesílení signálu na výstupu zesilovače. Vláknový optický zesilovač může zesilovat optický signál obsahující jednu nebo více vlnových délek v předem stanoveném přenosovém pásmu bez nutnosti přeměny optického.

Na obrázku 1.5 je zobrazen proces zesílení EDFA zesilovače založeném na tří-hladinovém modelu s čerpacím zdrojem na vlnové délce 980 nm. Foton z čerpací pumpy na vlnové délce 980 nm je absorbován ionty erbia v základní hladině, čímž dojde k přechodu do nejvyšší energetické hladiny. Následně díky nezářivému rozpadu iont ztratí svou energii a sestoupí do metastabilní hladiny. Jakmile je v metastabilní hladině, foton s vlnovou délkou 1530 nm vynutí stimulovaným přechodem iontu do jeho základní hladiny vytvořit další foton, čímž dojde k zesílení.



Obrázek 1.5: Proces zesílení v EDFA zesilovači použitím tří úrovněvého modelu [20]

Dále je detailnější popis tří-hladinového modelu EDFA zesilovače. Tento model je zobrazen na obrázku 1.6 Úroveň 1 je základní stav, úroveň 2 je známá jako metastabilní hladina, která má dlouhou životnost a úroveň 3 je přechodný stav. Populace úrovní je zavedena jako N_1 , N_2 , N_3 . Spontánní přechody iontů, které zahrnují zářivé a také nezářivé přechody jsou označeny jako 32 a 21 a korespondují s přechody mezi úrovněmi $3 \rightarrow 2$ a $2 \rightarrow 1$. σ_p je absorpce pumpy skrz oblast a σ_s je průřez emisního signálu. Intenzita dopadajícího světelného toku čerpacího zdroje a signál jsou označeny jakou ϕ_p s ϕ_s . Jsou definovány jako počet fotonů za jednotku času na jednotku plochy.



Obrázek 1.6: Příklad dotace pro tří-úrovňový model [20]

Tento tří hladinový model reprezentuje strukturu energetických úrovní E^+ , které se podílí na procesu zesílení. Pro dosažení zesílení, je nutná inverze populace mezi hladinami 1 a 2. Zde je brán

v potaz jedno-hladinový model, kde se předpokládá, že intenzita čerpacího zdroje, signálu a také rozložení E^U iontů jsou v příčném směru konstantní.

Na základě výše uvedených předpokladů je rovnice pro změnu populace pro všechny hladiny stanovena jako:

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\sigma_p\phi_p + (N_2 - N_1)\sigma_s\phi_s \quad (1.8)$$

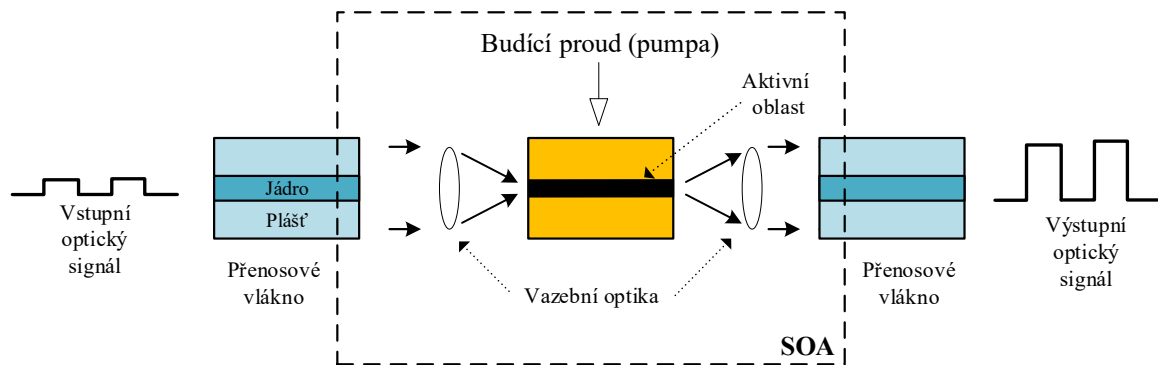
$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\sigma_s\phi_s \quad (1.9)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 - (N_1 - N_3)\sigma_p\phi_p \quad (1.10)$$

1.4 Polovodičové optické zesilovače

Polovodičové optické zesilovače (SOA) jsou velmi podobné polovodičovým laserům. Lasery mají zesilovací médium a mechanismus optické zpětné vazby. Ta je obecně poskytována rozštěpenými plochami samotného polovodiče nebo mřížkou s vhodnou periodicitou vyleptanou blízko zisku média. V mezním režimu se zisk rovná útlumu laseru a zisk potřebný pro laserovou činnost je obvykle 5 až 10 dB. Naproti tomu optické zesilovače typu TW obsahují pouze zesilovací médium. Nicméně zisk je obecně větší (20 až 25 dB) ve srovnání s laserem. Optický zisk je způsoben rekombinací elektronů a děr, která vzniká díky externímu proudovému zdroji, což ve výsledku způsobuje, že polovodičové zesilovače pracují s vyšší proudovou hustotou než je tomu tak u laserů v mezním režimu. [6]

Oblast s polovodičovými zesilovači je v posledních letech jedna z nejrychleji rostoucích. Typické použití SOA zesilovačů je zobrazeno na obrázku 1.7. Signál z přenosového vlákna je přiveden na vstup SOA zesilovače, kde je zesílen. Po zesílení je směřován zpět do vlákna. Navázání mezi vlákem a SOA zesilovačem je prostřednictvím vhodných optických vazebních členů. [20]

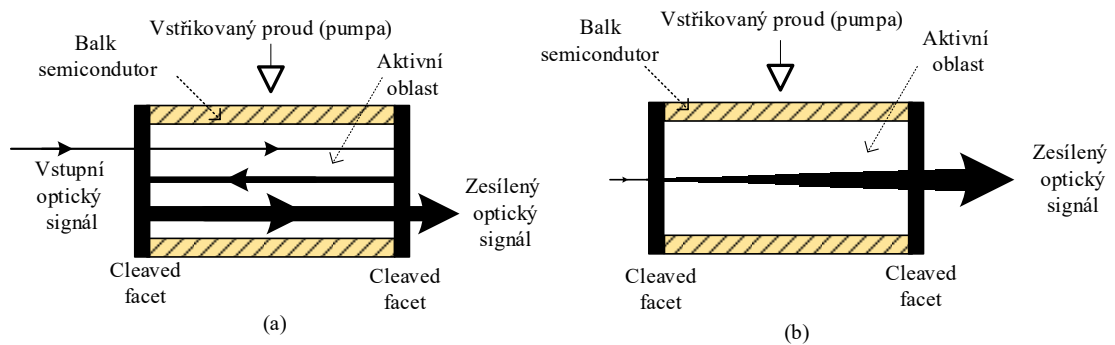


Obrázek 1.7: Konfigurace SOA zesilovače [20]

1.4.1 Typy SOA zesilovačů

SOA zesilovač je svou strukturou velmi podobný polovodičovým laserům. Existují dvě kategorie SOA zesilovačů, viz obrázek 1.8. FP zesilovače dosahují vysokého zisku, ale nestejnoměrného zesílení ve spektru vlnových délek, zatímco TW polovodičové zesilovače mají širokopásmový zisk s nižší hodnotou zesílení. FP zesilovače mají na obou koncích dutiny vysokou

míru odrazivosti, což vede k rezonančnímu zesílení a následně k velkému zisku na vlnové délce korespondující s longitudinálními módy Fabry-Perotovy dutiny.



Obrázek 1.8: Typy SOA zesilovačů: (a) FP-SOA; (b) TW-SOA [20]

TW-SOA zesilovače mají velmi malou odrazivost, která je způsobena antireflexní vrstvou (AR), což má za následek zesílení v širokém spektru vlnových délek s malou proměnlivostí zesílení, které je způsobené zbytkovou plošnou odrazivostí. Je mnohem vhodnější pro nasazení v systémech, ale zisk musí být polarizačně nezávislý. Fenomenologický výraz pro zisk SOA zesilovačů je dán vztahem: [20]

$$g_m = a(n - n_0) - a_2(\lambda - \lambda_p)^2. \quad (1.11)$$

Nejvyšší hodnota vlnové délky je následně určena následující rovnicí:

$$\lambda_p = \lambda_0 + a_3(n - n_0), \quad (1.12)$$

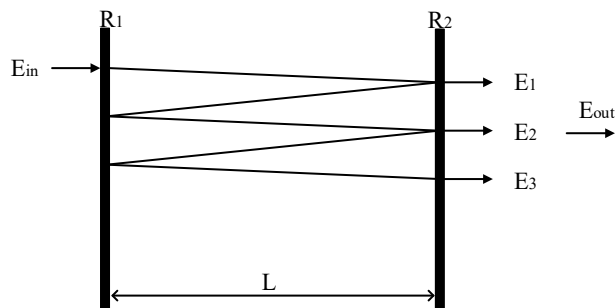
přičemž z předchozích rovnic je zisk s 3 dB šířkou pásma určen vztahem:

$$2\Delta\lambda = 2\sqrt{\frac{a(n - n_0)}{2n_2}}. \quad (1.13)$$

Typické hodnoty parametrů SOA zesilovačů jsou uvedeny v tabulce 1.2. Po dosazení typických hodnot uvedených v tabulce je šířka pásma SOA zesilovačů rovna 54 nm. Základní model Fabry-Perotova zesilovače je uveden na obrázku 1.9.

Tabulka 1.2: Základní parametry SOA zesilovačů [20]

Parametr	Symbol	Hodnota
Diferenční zisk	a	$2,7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
Koeficient zisku	a_2	$0,15 \text{ cm}^{-1} \times \text{nm}^{-2}$
Koeficient zisku	a_3	$2,7 \times 10^{-17} \text{ nm} \times \text{cm}^{-3}$
Hustota transparentnosti	n_0	$1,1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Délka zesilovače	L	$350 \text{ } \mu\text{m}$
Prahová hodnota transparentnosti	N_{th}	$1,8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Obrázek 1.9: Základní model Fabry-Perotova zesilovače[20].

1.4.2 RSOA

Reflektivní polovodičové optické zesilovače RSOA využívají vysokou odrazivost materiálu, povrchovou úpravu jedné z hraničních ploch a antireflexního povrchu na druhé ploše ke generování zdrojového signálu. Vlnovodná struktura polovodičového RSOA je podobná s konvenčními SOA zesilovači a dosahují většího zisku a při menší hodnotě budicího proudu. RSOA mají potenciál stát se vhodnými kandidáty pro využití ve WDM-PON systémech a sítích využívající principu prstencových sítí kombinující laditelné lasery.

Jedna z ploch SOA je potažena antireflexní vrstvou (AR) a slouží jako vstupní a výstupní port. Zatímco druhá plocha je potažena vysoce reflexní vrstvou (HR), aby splňovala vlastnost vysoké odrazivosti. Vstupní optický signál je zesílen a odražen zpět na stejný port. Typická hodnota zisku mezi vlákny se pohybuje od 10 do 20 dB. [6]

1.4.2.1 Výkonnost RSOA

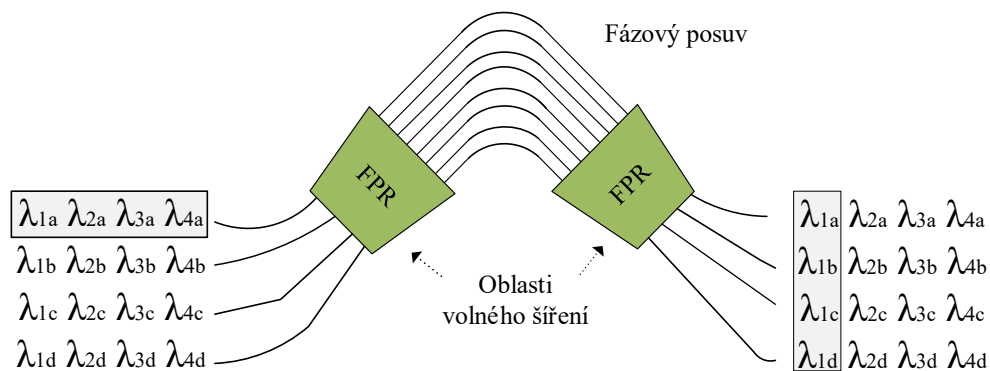
RSOA se vyrábějí pro oblast vlnových délek v rozsazích kolem 1550 nm a 1300 nm, ačkoliv většina aplikací pracuje v oblasti 1550 nm. Maximální hodnota zisku se zvyšuje a posunuje k menším vlnovým délkám se snižující se teplotou. Zařízení má vypálenou heterogenní strukturu aktivní oblasti vyrobenou za použití InP/InGaAsP. Má vstupní plochu s odrazivostí $< 0,01\%$, tato nízká odrazivost resultuje v malou proměnlivost zisku ve spektru. [6]

2 Prvky WDM systémů

2.1 AWG

AWG jenž lze dohledat pod celou řadou označení, například vlnovody uspořádané do mřížky, optické fázové pole či směrová odbočnice zastupuje v DWDM systémech funkci de/multiplexoru. V DWDM systémech se využívá pro jeho vlastnost de/multiplexovat velmi vysoký počet WDM kanálů s relativně nízkou hodnotou vložného útlumu.

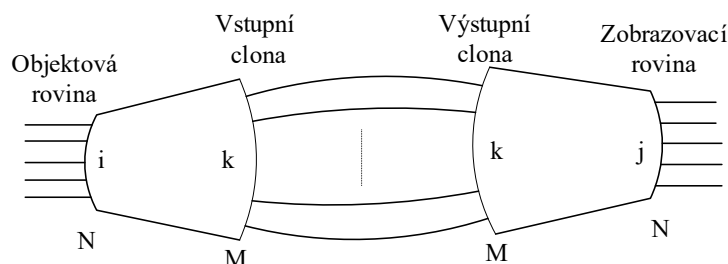
Na obrázku 2.1 je zobrazeno schematické znázornění AWG směrové odbočnice typu N:M obsahující N vstupních a M výstupních portů. Zařízení se skládá ze dvou hvězdicových vlnovodů s oblastmi volného šíření FPR, které jsou propojeny vlnovodným polem, ve kterém mají přilehlé sousední vlnovody konstantní rozdíly délek.



Obrázek 2.1: N:M AWG jako konvertor mezi sloupci a řadami[8]

2.1.1 Princip činnosti AWG

Optický signál přicházející na vstup vlnovodu je v první oblasti volného šíření FSR pomocí difrakce rozložen a přiveden na vstupní část vlnovodného pole. Konstantní rozdíl ΔL mezi sousedními vlnovody se rovná celo-násobku m střední vlnové délky λ_0 demultiplexoru. V důsledku toho bude rozložení pole na vstupní cloně reprodukováno na výstupní aperturu druhé FSR oblasti. V případě, že se vstupní vlnovod soustředí na vstupní rovinu je střední vlnová délka fokusována do středu obrazové roviny. Ve chvíli, kdy se vstupní vlnová délka odchyluje od střední vlnové délky dochází v poli k fázové změně. Kvůli konstantnímu rozdílu délek sousedních vlnovodů se poté fázové změny zvyšují lineárně od vnitřních do vnějších vlnovodů v poli, což způsobuje, že vlnoplochy se zobrazí na výstupní cloně. Následně ohnisko v obrazové rovině v druhé oblasti FSR je posunuto ze středu, tak aby mohlo dojít k prostorovému oddělení různých vlnových délek pomocí příslušného posunutí na výstupní vlnovody.



Obrázek 2.2: Číslování vstupních/výstupních vláken a pole vlnovodů v AWG[8]

Relativní fáze na vstupu i, výstupu j a pole vlnovodů k, kde $k = 1, 2, \dots, m$) dle obrázku 2.2 je dána vztahem:

$$\phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_{ik}^{\text{in}} + n_2 k \Delta L + n_1 d_{kj}^{\text{out}}), \quad (2.14)$$

kde $d_{ik}^{\text{in}} = d_i^{\text{in}} + k \delta_i^{\text{in}}$ a $d_{kj}^{\text{out}} = d_j^{\text{out}} + k \delta_j^{\text{out}}$ jsou rozdíly vzdáleností mezi vstupem i, polem vlnovodů k a výstupem j. Poté relativní fáze může být vyjádřena vztahem:

$$\phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda} (d_i^{\text{in}} + d_j^{\text{out}}) + \frac{2\pi k}{\lambda} (n_1 \delta_i^{\text{in}} + n_2 k \Delta L + n_1 \delta_j^{\text{out}}) = \phi + \Delta \phi \quad (2.15)$$

Důležitým konstrukčním parametrem AWG čipu jsou optické odstupy a indexy lomů jednotlivých vlnovodů. S $n_1 \delta_i^{\text{in}} + n_2 k \Delta L + n_1 \delta_j^{\text{out}} = p \lambda_j$ a celým číslem p, fázový rozdíl $\Delta \phi$ může také být napsáno jako $\Delta \phi = 2\pi k p$. λ_j se fázově přidá na vstupu j a tedy bude umístěna na výstupu j. V závislosti na $n_1 \delta_i^{\text{in}} + n_2 k \Delta L + n_1 \delta_j^{\text{out}} = (p+1) \lambda_j'$, λ_j' bude také přítomen na výstupu j. Rozdíl ve frekvenci mezi dvěma vlnovými délkami, které mohou být směřovány na stejný výstupní port (pro $\Delta p = 1$) je označován jako FSR filtr. S $p \lambda = \frac{pc}{f} = (p+1) \frac{c}{f'}$, FSR je dán vztahem:

$$\text{FSR} = f' - f = \frac{c}{n_2 \Delta L} \quad (2.16)$$

Pokud je správně navržen, tak AWG je schopné směřovat jednu vlnovou délku v C pásmu další v L pásmu ke každému výstupnímu portu. Kromě toho další vlnové délky v U, S, E a O pásmech mohou být také směřovány na příslušné porty. Na tomto principu pracuje prvek pod označením cyklické AWG. Cyklická vlastnost může být použita např. pro vylepšení pásem vlnových délek formou navýšení kapacity WDM systémů nebo v systémech, které pro svou činnost využívají jedno optické vlákno, např. WDM-PON sítě. V ITU doporučení G.698.3 bylo standardizováno cyklické AWG až s 48 porty v C pásmu s rozestupy jednotlivých vlnových délek 100 GHz.

Přenosová funkce pro vstupní vlnovody v blízkosti optické osy lze aproximovat jako:

$$T_X = \sum_{k=1}^M A_k \exp(j\phi_k + j \frac{2\pi}{\lambda_X} k n_2 \Delta L), \quad (2.17)$$

kde M je počet vlnovodů, ϕ_k a A_k jsou fáze a útlum k-tého vlnovodu. Především závislost na stavu FSR, AWG lze navrhnout s rozdílnými přenosovými spektrálními charakteristikami na jednotlivé kanály. AWG prvky jsou běžně vyráběny dle dvou specifikací, AWG s Gaussovským nebo s FT přenosem. FT AWG jsou výsledkem zkracování přenosového maxima Gaussovského tvaru. Při použití AWG pro WDM systémy je potřeba tuto charakteristiku zvážit. Obvykle AWG s Gaussovským tvarem mají užší propustné pásmo, nižší vložný útlum a menší fázové zvlnění. Pro mnoho aplikací je použití Gaussovského AWG lepší volbou pro demultiplexory, zatímco FT AWG jsou preferovanější volbou pro vícenásobné plexery nebo slučovače.

Jako zařízení s integrovanými vlnovody AWG prokazuje silnou teplotní závislost. Teplotně vyvolaný posun vlnových délek lze vyjádřit jako:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \frac{\lambda}{nL} \left(\frac{\partial (nL)}{\partial T} \right) = \frac{\lambda}{nL} \left(n \frac{\partial L}{\partial T} + L \frac{\partial n}{\partial T} \right) = \lambda \left(\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) = \lambda \left(\alpha + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right). \quad (2.18)$$

Pro oxid křemičitý, $\frac{\partial n}{\partial T}$ je v rozsahu $7,5 \times 10^{-6}/^{\circ}$ a pro křemík $\alpha = 2,63 \text{ ppm}/^{\circ}$. Prvky v křemíkovém čipu mají následně posun vlnových délek $\frac{\partial \lambda}{\partial T} = 1212 \text{ pm}/^{\circ}$. 50 GHz DWDM zařízení ($\sim 400 \text{ pm}$ kanálový rozestup) je zcela transparentní každých 400 pm a neprůhledný mezi nimi. Zařízení přestává korektně fungovat při změně teploty $\sim 17^{\circ}\text{C}$. Z tohoto důvodu jsou AWG často teplotně stabilizovány.

Teplotní stabilizace je obvykle dosažena pomocí mechanické nebo materiálové kompenzace. Pomocí mechanické kompenzace je v bodě, kde je přiveden vstupní signál mechanicky korigovaný prostřednictvím elementu vláknové spojky jejíž teplotní roztažnost je navržena tak, aby kompenzovala teplotní posun AWG čipu. V materiálové kompenzaci jsou vlnovody navrženy tak, aby byly svou podstatou atermální.

Tabulka 2.1 Experimentální parametry AWG [8]

Parametr	Hodnoty			
Kanálové rozteče	100 GHz	50 GHz	25 GHz	25 GHz
Počet kanálů	32	64	128	256
Útlum čipu	2,1 dB	2,8 dB	3,5 dB	2,7 dB
Šířka pásma @ 3 dB	49 GHz	19 GHz	11 GHz	14 GHz
Celková izolace	28 dB	27 dB	16 dB	33 dB

Komerční AWG jsou dostupné pro 32 a 40 kanálů při 100 GHz a 64, 80 a 96 kanálů pro 50 GHz rozteče jednotlivých kanálů. Jsou již vyráběny experimentální zařízení s velmi vysokým počtem portů a WDM mřížkou s 12,5 GHz rastrem. V tabulce 2.1 je zobrazen přehled několika experimentálních AWG.

Pro celkový vložný útlum musí být zvážena i spojka optického vlákna. Dále je nutné počítat s útlumem pro teplotní posun, i když je zařízení stabilizované nebo kompenzované. Obvyklý celkový vložný útlum pro 100 nebo 50 GHz AWG je v rozsahu 5 až 6 dB. [8]

2.2 Příjímače ve WDM systémech

Ve vysoko rychlostních WDM přenosech jsou téměř výhradně používány jako fotodetektory fotodiody. Dva typy nejběžněji používány jsou popsány níže v následujících kapitolách.

2.2.1 PIN fotodiody

P-N přechod v polovodičích lze použít jako vysoko-rychlostní fotodetektor. K zlepšení citlivosti je umístěn lehce dopovaný intrinzitní polovodič mezi P a N polovodiče, z čehož vzniklo pojmenování p-i-n nebo PIN fotodioda. Aby bylo dosaženo absorpce v intrinzitní oblasti jsou P a N oblasti udrženy na požadované detekční pásmo vlnových délek jako transparentní. To vede k dvojité heterogenní struktuře diody. Primární fotoproud vyplývající z absorpce po celé šířce W je dán vztahem:

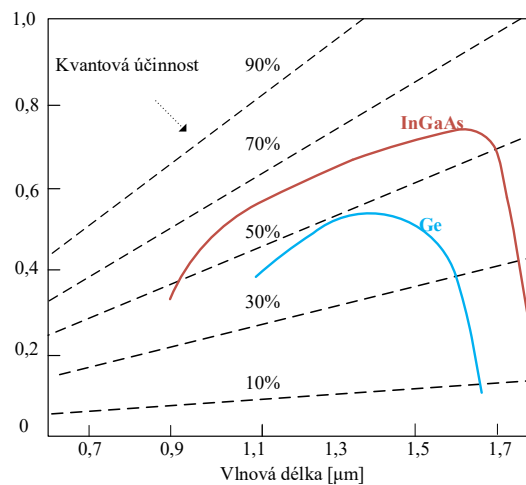
$$I_p = \frac{q}{h\nu} P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)W}) (1 - R_f) = R P_0, \quad (2.19)$$

kde P_0 je dopadající optický výkon, $\alpha_s(\lambda)$ je signál (vlnová délka) - závislý koeficient absorpce vyprázdněné oblasti, q je náboj elektronu, $h\nu$ je energie fotonu a R_f odrazivost vstupní plochy. Externí kvantová účinnost η je definována jako poměr vygenerovaných párů elektron-díra a dopadajících fotonů:

$$\eta = \frac{I_P \times q^{-1}}{P_0 \times h\nu^{-1}} \quad (2.20)$$

Citlivost polovodičových materiálů je funkce vlnové délky. Obrázek 2.3 zobrazuje citlivost materiálů InGaAs a Ge, což jsou materiály pokrývající odpovídající WDM přenosové šířky pásma. Pro vlnové délky $\lambda < 900$ nm lze použít materiál Si. Citlivost R PIN fotodiody lze definovat jako:

$$R = \frac{I_P}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (A \times W^{-1}) \quad (2.21)$$

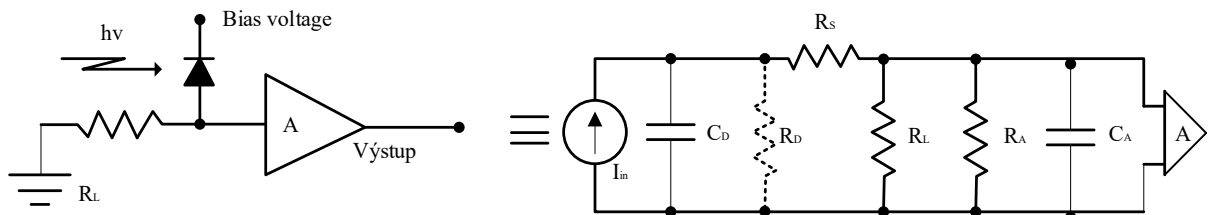


Obrázek 2.3: Spektrální citlivost Ge a InGaAs fotodiod [8]

Pro PIN fotodiody existuje kompromis mezi efektivitou v podobě citlivosti a následně poměru signálu k šumu S/N a šířkou pásma. Velká šířka pásma PIN diod je stanovena malým přechodovým časem t_T , malým RC přijímače, skládající se z fotodiody a zesilovače a malého difúzního času nosičů fotonů mimo vyprázdněnou oblast. Přechodový čas skrz vyprázdněnou oblast je dán vztahem:

$$t_T = \frac{W}{v_d}, \quad (2.22)$$

kde v_d je rychlost proudění, která je v rozsahu $10^5 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$. Je zřejmé, že rychlý přechod W musí být krátký. Rozptyl mimo vyprázdněnou oblast je relativně pomalý, ale nezávislý na šířce W . Šířka pásma, která je výsledkem časové konstanty RC přijímače uvedeném na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Přijímač fotodiody (vlevo) a odpovídající obvod (vpravo) [8]

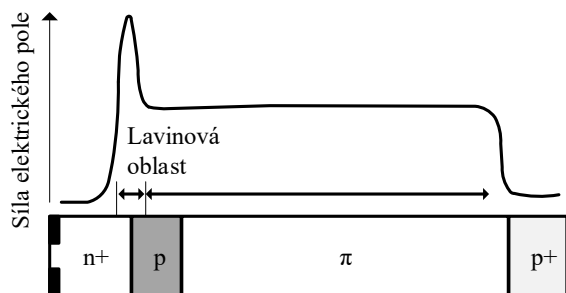
Levá část obrázku 2.4 zobrazuje fotodiodu připojenou k odporu zátěže R_L a zesilovač. Pravá strana obrázku zobrazuje ekvivalentní obvod s ideální diodou v podobě proudového zdroje a zesilovač. R_D a C_D jsou odpor a kondenzátor fotodiody, R_S je další sériový odpor a R_A a C_A jsou parametry zesilovače. Když $R_D > \infty$, tak je poté časová konstanta přijímače dána pomocí vztahu:

$$R_T = R_S \parallel R_L \text{ a } C_T = C_D + C_A . \quad (2.23)$$

Jelikož $C_D = \varepsilon A/W$, kde A je P-N přechodová oblast a ε je permitivita, je potřeba, aby se šířka W rozšířila. To samé platí pro vyšší citlivost, ale je to v rozporu s rychlým přenosem skrz vyprázdněnou oblast. Proto W musí být vybráno s ohledem pro vysokorychlostní diody.

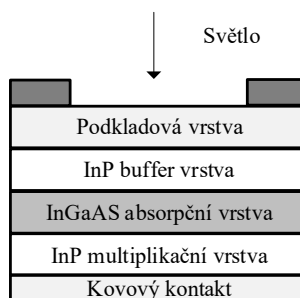
2.2.2 Lavinové fotodiody

Lavinové fotodiody APD jsou odvozeny od PIN diod, které poskytují vlastní zisk pomocí kontrolovatelného lavinového efektu. APD jsou dopovány, tak že do lavinové oblasti s velmi vysokou silou elektrického pole je přivedeno vysoké závěrné napětí. Tato oblast poté zobrazuje vnitřní proudový zisk díky vlivu ionizace, neboli lavinovému efektu. V případě Si APD diod je závěrné napětí v rozsahu 100-200 V a je schopné poskytovat proudový zisk kolem 100. Přepětí pro Ge a InGaAs jsou podstatně nižší. Obecně platí, že vyšší závěrné napětí vede k vyššímu zisku, který ale obsahuje generovaný šum. Struktura APD je zobrazena na obrázku 2.5 společně se silou elektrického pole kolem.



Obrázek 2.5: Struktura APD a síla elektrického pole podél její struktury [8]

APD pro WDM aplikace může být založeno na stejném polovodičovém materiálu, který je použit u PIN fotodiod. Si-APD detekují viditelné a blízké infračervené oblasti, které nejsou obvykle ve WDM systémech používány. Germanium Ge detekuje infračervené záření až do 1,7 μm , ale má vysoký multiplikační šum. InGaAs lze použít až do větších vlnových délek než 1,6 μm , a má menší multiplikační šum než Ge. Normálně se používá jako absorpční oblast heterogenních struktur diod, které obvykle využívají InP jako základní a multiplikační vrstvu. Výsledná struktura je uvedena na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Struktura InP/InGaAs APD [8]

Citlivost APD lze vyjádřit ziskem M , kde pro PIN fotodiody je hodnota $M = 1$:

$$R_{APD} = \frac{\eta q}{h\nu} \times M = R_{PIN} \times M, \quad (2.24)$$

kde M je dáno $M = I_M/I_P$, I_M je průměrná hodnota celkového násobku výstupního proudu a I_P je základní fotoproud. Jelikož je šumové číslo $F(M)$ zvyšující se s M , existuje optimální hodnota M , která maximálně zvyšuje S/N . Pro sinusově modulované signály $s(t)$ s modulačním indexem $m = 1$, je dán optimální zisk vztahem:

$$M_{opt}^{x+2} = \frac{2qI_L + 4k_B T/R_L}{xq(I_P + I_D)}. \quad (2.25)$$

Zisk závislý na šumovém čísle je dán $F(M) \approx M^x$. Překročení šumového faktoru, který je produkovan násobením výstřelového šumu a temného proudu APD diod je dostatečně nízké, aby umožnilo zisku šířky pásma produkovat v přebytku 100 GHz pro InP/InGaAs systémy a až do 400 GHz pro InGaAs na základně využití materiálu Si. Díky těmto vlastnostem je umožněna vysokorychlostní činnost a využití v komerčních zařízeních schopných pracovat s přenosovými rychlostmi 10 Gbit/s⁻¹. Porovnání příslušných parametrů fotodiody je uvedeno v tabulce 2.2 [8]

Tabulka 2.2: Porovnání PIN a APD [8]

Parametr	PIN		APD	
	Ge	InGaAs	Ge	InGaAs
Rozsah vlnových délek – λ [nm]	900–1 650 n	1 000–1 700	900–1 650	1 000–1 700
Citlivost – R [A/W]	0,4–0,5	0,7–0,95	-	-
Kvantová účinnost – η [%]	50–55	60–70	-	-
Temný proud – I_D [nA]	50–500	0,5–5	50–500	5–50
Náběžný čas – τ_r [ns]	0,1–0,5	0,05–0,5	0,5–0,8	0,1–0,5
Šířka pásma – B [GHz]	0,5–3	1–40	Max. 1,5	1–5
Faktor k – k_A [-]	-	-	0,7–1,0	0,5–0,7
Lavinový zisk – M [-]	-	-	50–200	10–40

2.3 Vysílače ve WDM systémech

2.3.1 Fabry-Perotovy laserové diody

Fabry-Perotovy laserové diody (FP-LD) jsou nejjednodušší dvojité heterogenní laserové diody. Aktivní vrstva tvoří Fabry-Perotovu dutinu, což vede ke generování více-longitudálním módům MLM laserů na rozdíl od jedno longitudální mód (SLM) lasery, které vyžadují další intenzitu pro výběr režimu. Počet excitovaných módů a následně šířka pásma závisí na zisku spektra polovodičového materiálu. Ačkoli jednotlivé módy mohou být spektrálně velmi úzké je to spektrální šířka jejich obálky, která určuje především toleranci s ohledem na chromatickou disperzi. Díky široce generujícímu spektru jsou FP-LD vhodné pro přenosové rychlosti až do $2,5 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ a na vzdálenosti až do 100 km, čímž tvoří skupinu lehce dostupných zdrojů pro nízko nákladové WDM systémy.

2.3.2 DFB a DBR laserové diody

DFB a DBR laserové diody jsou nejběžnější SLM lasery pro vysoké přenosové rychlosti na velké vzdálenosti WDM přenosů. Ve srovnání s FP-LD jsou do longitudální struktury přidány vidově selektivní periodické mřížky. Toto mřížkování je vyleptané do polovodičového materiálu, buď pod aktivní vrstvu DFB LD nebo vedle aktivní vrstvy DBR LD.

Hlavní rozdíl mezi oběma strukturami je laditelnost. DFB struktura může být ze své podstaty laditelná pouze uvnitř úzké šířky pásma pomocí teplotního ladění, avšak se všemi důsledky jako je teplotně závislý zisk. DBR struktura odděluje oblast zisku od vidově selektivní oblasti, mřížková oblast, která vede k širokospektrálnímu ladění.

Periodická struktura v DFB a DBR laserech tvoří Braggovské mřížky. V důsledku toho, vlnová délka DFB a DBR laserových diod je dána vztahy:

$$\lambda = \lambda_B \mp \frac{\lambda_B^2 (m + \frac{1}{2})}{2nL} \quad (2.26)$$

$$\lambda_B = \frac{2n\Delta}{k}, \quad (2.27)$$

kde λ_B je odpovídající Braggovská vlnová délka a m je celé číslo. DFB a DBR laserové diody mohou dosáhnout úzké spektrální čáry vhodné pro koherentní vysokorychlostní WDM přenosy, vysoký výstupní výkon a nízký šum. Efektivně potlačují nežádoucí módy. Kromě toho, DBR lasery lze vyrobit jako širokopásmové laserové zdroje.

2.3.3 VCSEL

VCSEL používají vertikální vstřikování proudu a poskytují vertikální emisi světla. První VCSEL lasery byly představeny v roce 1979, avšak zařízení pro CW aplikace při pokojové teplotě byly představeny až po roce 1988. Dnes VCSEL lasery nahrazují hranově emitující lasery krátkého. V současné době jsou považovány za nízkonákladové zdroje pro WDM-PON systémy a v porovnání s hranově emitujícími polovodičovými lasery mají VCSEL radiálně symetrické Gaussovské blízké pole, které usnadňuje vazbu na optiku nebo vlákno. Kromě toho, VCSEL technologie umožňuje výrobu dvourozměrných laserových polí.

VCSEL lasery využívají tenkou aktivní oblast, která vede k poměrně nízkému zisku. Z tohoto důvodu je nutná vysoká odrazivost na hraničních dutinách. Proto je použit střídavě nízkého a vysokého indexu dielektrika pod a nad aktivní vrstvou. Kromě toho, VCSEL lasery jsou omezeny díky velkému odporu a tudíž odvod tepla může způsobovat problém, který dále omezuje výstupní výkon. Frekvenční (např. longitudální mód) rozestup VCSEL laserů je dán $\Delta\lambda = c/2nl$, kde l je délka dutiny. Když je hodnota l dostatečně malá, tak se rozestupy módů zvýší až za mezní oblast zisku šířky pásma a je dosaženo jedno-vidové činnosti.

2.3.4 Laditelné laserové diody

Laditelné laserové diody jsou nezbytné ve flexibilních WDM transportních sítích. Jsou vyžadovány pro optimalizaci síťové kapacity v součinnosti s bezbarvými a nesměrovými konfigurovatelnými add-drop multiplexery ROADM. Kromě toho, mechanismy založené na ochraně vlnových délek se stávají jednodušší a více účinnější. Laditelné lasery jsou také vyžadovány ke snížení počtu různých vysílacích variant. To umožňuje snížení CapEx nákladů zařízení, a také se podílejí na snížení nákladů na inventář. V systémech WDM-PON jsou laditelné lasery jedním ze způsobů, jak dosáhnout bezbarvých ONU jednotek. Bezbarvé ONU jednotky nemají pevně danou pracovní vlnovou délku, což by neumožňovalo masovému nasazení. Alternativní možnosti k laditelným laserům pro ONU jednotky je nasazení reflexních ONU jednotek založených na reflexních komponentech, jako je odrazný polovodičový optický zesilovač RSOA, REAM nebo IL-FP lasery.

Laditelnost laserů lze dosáhnout pomocí následujících 3 způsobů:

1. Elektronickým laděním.
2. Teplotním laděním.
3. Mechanickým laděním.

Mimo to lze považovat pole DFB jako kvazi-laditelné vysílače. Jako další potenciální laserový zdroj lze považovat lasery s kvantovými body. Zatím tyto lasery podporují vlnové délky v rozsahu 1 050–1 320 nm. Elektronické ladění se odkazuje na princip uplatnění elektrického pole, které přímo ladí frekvenci laserů. Jeden z relevantních typů teplotně laditelných laserů je MG-SGC DFB laser. Pro mechanické ladění lze definovat dvě příslušné třídy:

- Mikroelektromechanická vertikální dutina s povrchovou emitací (MEM-VCSEL).
- Laser s vnější dutinou (ECL).

Ze seznamu více oblastních DBR (DS-DBR, SG-DBR) laserů získaly komerční význam jako WDM laditelné vysílače. Číslo módu m a vlnová délka λ laserové diody jsou závislé na efektivním indexu lomu a rozměrech dutiny, tj. efektivní délka L , viz následující vztah:

$$\frac{m\lambda}{2} = \bar{n}L, \quad (2.28)$$

z čehož plyne, že laditelnost laserové diody lze dosáhnout laděním těchto parametrů dle následujícího vztahu:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\bar{n}}{\bar{n}} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta m}{m}, \quad (2.29)$$

u prvních dvou členů na pravé straně lze uplatnit elektrické, teplotní a mechanické ladění. Během ladění může vést třetí člen k módovým skokům s následnými skoky vlnové délky. Laditelné

více-sekční DBR lasery jsou v dnešní době v masové produkci. Výhodou těchto laserů je skutečnost, že jsou monoliticky integrované, což snižuje jejich cenu.

Základ jakýkoliv laditelných monoliticky integrovaných více sekčních DBR laserů je tří sekční DBR laser. Příslušné tři sekce jsou zisk, fáze a zadní část. Oblast zisku poskytuje generování zisku, není vlnově selektivní a poskytuje zisk v relativně širokém spektru. Zadní sekce je schopná vybrat jednu spektrální čáru prostřednictvím Braggovské mřížky, která je vyleptána do podkladu. Fázová sekce může poskytovat stupeň jemného ladění. Z tohoto důvodu nemohou tří-sekční DBR lasery poskytovat schopnost ladění v celém pásmu, např. skrz celé C pásmo. [18]

3 Technologie WDM-PON

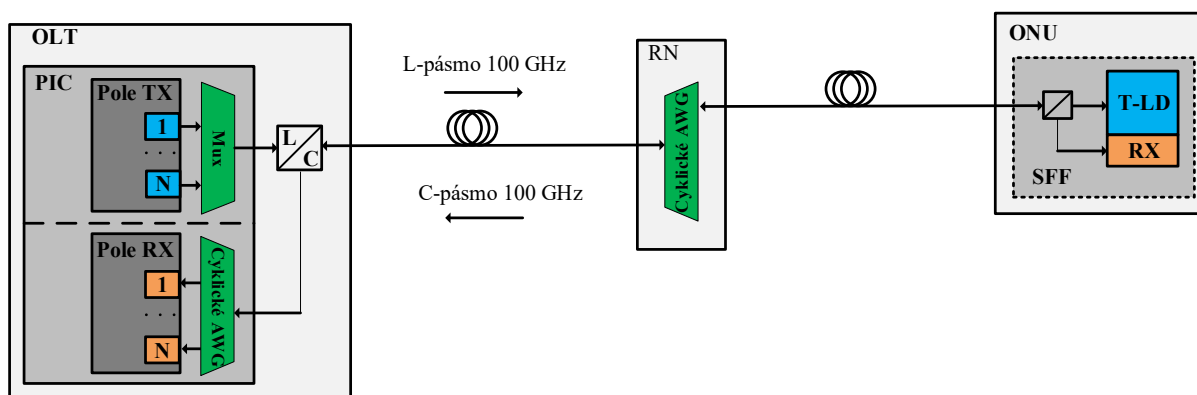
Požadavky pro bezbarvé nebo vlnově agnostické ONU jednotky vedly k nutnosti použití laditelných laserů v ONU jednotkách. Aktuálně jsou takové typy laserů nepříjemně drahé, tak aby bylo umožněno nasazení WDM-PON systému s širokou rozšiřitelností do přístupových sítí. Toto vede k nasazení reflexních WDM-PON řešení, přičemž současně probíhá vývoj laditelných laserů, které bude možné nasadit v přístupových PON sítích.

3.1 WDM-PON s fixními nebo laditelnými vysílači

Na obrázku 3.1 je uveden základní blokový diagram WDM-PON systému založeném na laserových diodách. Tři hlavní elementy, které tvoří jakékoliv efektivní WDM-PON řešení jsou:

1. Cyklické AWG umístěné v RN pro zajištění činnosti na jednom optickém vlákně.
2. V OLT jednotkách systém obsahující pole vysílačů.
3. Přijímače v ONU jednotkách založené na nízko-nákladových komponentech (frekvenčně agnostický vysílač, diplexer a vhodné přijímače s mechanickým laděním).

Využití cyklických AWG prvků je nejelegantnější způsob k zajištění přenosu po jednom vlákně ve WDM-PON sítích. Ostatní filtrační technologie jako TFF je také možné využít, ale vede to buď k přidání diplexorů pro kombinování vzestupného i sestupného směru přenosu nebo mají vyšší vložný útlum. Na obrázku 3.1 je zobrazeno použití cyklického AWG zařízení v optických pásmech C a L.



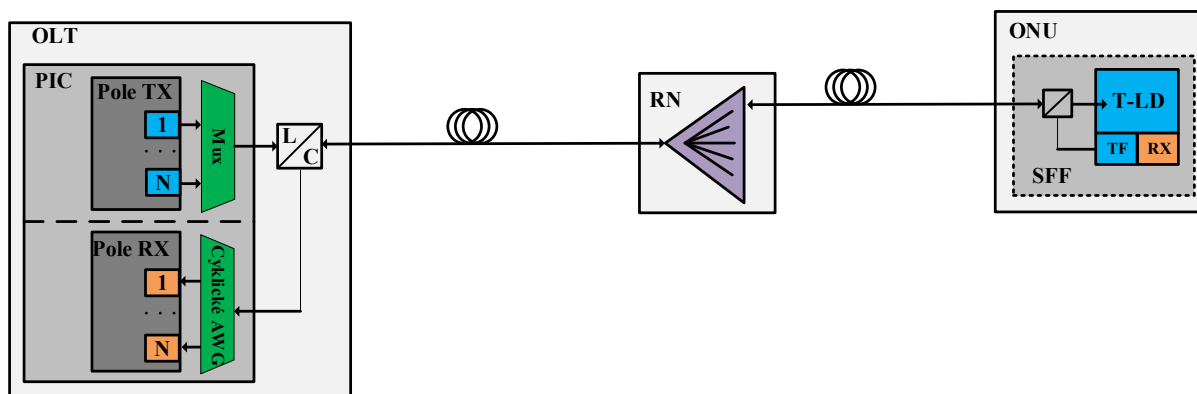
Obrázek 3.1: Obecný typ WDM-PON s fixními nebo laditelnými vysílači v laserovém poli v OLT jednotce a laditelné lasery v ONU jednotkách [18]

Je vyžadováno použití technologií soustřeďujících v OLT jednotkách vysílače do maticových polí. Využití těchto fotonických integrovaných technologií a jejich příslušných komponent je vyžadováno z mnoha důvodů, které jsou snížení CapEx nákladů na jednotlivé komponenty, energetickou spotřebu a rozměry. Maticové pole specializovaných vysílačů např. SFP, SFF a XFP nelze díky jejich energetické spotřebě a celkové velikosti v OLT jednotkách použít. Toto platí zejména při porovnání EPON/GPON a XG-PON řešení. Fotonické integrované obvody v OLT jednotkách obsahují dvě maticové pole, první pro sadu laserových vysílačů a druhé pro sadu přijímačů. V případě, že se PIC skládá ze všech kanálů není již nutná potřeba laditelnosti laserových vysílačů, nicméně laditelnost jednotlivých vysílačů se může pozitivně odrazit na produktivitě a ceně fotonických integrovaných obvodů PIC.

Koncové ONU jednotky musí splňovat následující podmínky: nízké pořizovací náklady, malá energetická spotřeba, vlnovou nezávislost neboli vlastnost bezbarvosti. Jak nízká cena, tak i malá energetická spotřeba vede k požadavkům na technologické řešení bez použití chladičho prvku a zařízení pro naladění na požadovanou vlnovou délku. Tyto požadavky vedou k speciálnímu systému ladění ve WDM-PON systémech.

3.2 WDM-PON s výkonovými rozbočovači v RN

Základní varianta WDM-PON systému založeném na laserech je zobrazena na obrázku 3.2. Tato varianta je postavena na použití v optické distribuční síti ODN optických rozbočovačů resp. slučovačů na rozdíl od použití AWG prvku.



Obrázek 3.2: WDM-PON s laditelnými lasery v ONU podporující výkonový dělič ODN [18]

Využití WDM systémů postavených na optických rozbočovačích v distribuční síti může být ovlivněno migrací do stávající infrastruktury s technologiemi EPON či GPON. Oproti schématu uvedenému na obrázku obrázek 3.2, nyní WDM-PON systémy vyžadují další vlnově selektivní komponenty.

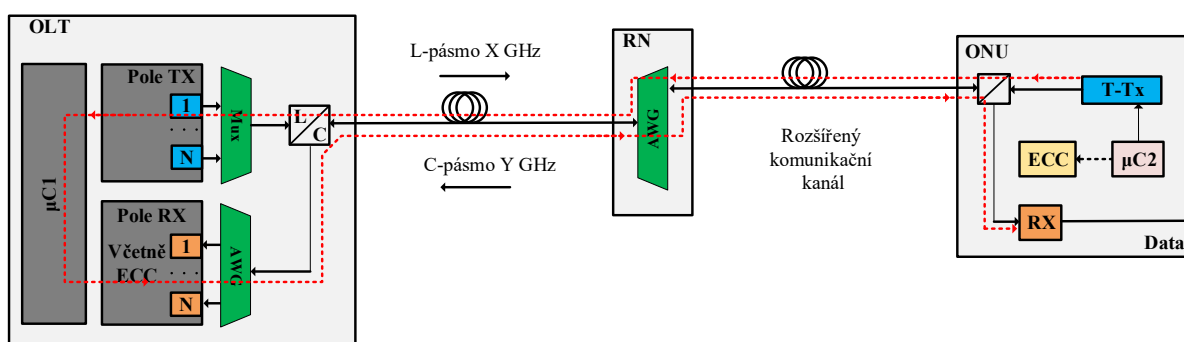
Funkce vlnově selektivních komponent je vyžadována, neboť je použito pasivního rozbočovače, který neprovádí žádnou filtraci vlnových délek, jak je tomu u AWG. Existují dvě možnosti pro vlnově selektivní přijímače, a to laditelné filtry nebo koherentní detekce použitím laditelných lokálních oscilátorů, např. laditelný lokální laser. Ve srovnání se širokopásmovým přímo detekčním přijímačem zobrazeném na obrázku 3.2, obě možnosti zvyšují ceny ONU jednotky WDM-PON systému a musí být tudíž vedeny jako kritická komponenta. Vzhledem k výkonu systému WDM-PON by měly být provozovány přes filtry. Kromě toho, jedna z hlavních výhod WDM-PON sítí, jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly, při využití optické distribuční sítě založené na rozbočovačích, ztrácí výkonnost na dlouhé vzdálenosti. V případě využití AWG zařízení, které mají vložený útlum typicky 4–5 dB, zatímco útlum pasivního rozbočovače se zvyšuje exponenciálně s počtem výstupních portů, například rozbočovač 1:64 má přibližně útlum 20 dB a 1:1024 rozdělení by vedlo k téměř 35 dB vloženého útlumu.

Jedním z nejdůležitějších faktorů jak vytvořit laditelné lasery s nízkou pořizovací cenou je snížit jejich komplexnost, čili každá subkomponenta, která není absolutně nutná, musí být vynechána. Kromě toho, většina síťových operátorů požaduje vysílače bez chladičho systému, aby se snížily pořizovací náklady a náklady spojené s energetickou spotřebou. Laditelnost vysílačů by také neměla hrát významnou roli v celkových nákladech. Z tohoto důvodu musí být zvoleny lasery, které jsou ze

své podstaty laditelné, například tří-sekční DBR lasery. Dále také kvůli snížení nákladů, by měla být, vynechána komponenta pro naladění na příslušnou vlnovou délku. Výsledkem je monolitický integrovaný více-sekční laser bez vlnového ladění a chladiče, což vytvoří komponentu, která je velmi levná a zároveň není složitější než nízkonákladové SFP nebo EPON/GPON vysílače. Avšak vzhledem k tomu, že výsledné zařízení bude postrádat součást pro vlnové ladění, bude muset být v celém systému prostředek pro ladění ONU. [18]

3.3 Princip ECC v WDM-PON

Obecně jsou možné dva způsoby pro ladění ONU v PON systémech, např. ladění prostřednictvím OLT a ladění prostřednictvím RN. Oba způsoby umožňují implementaci distribuovaného, sdíleného vlnového ladění při nižší ceně než je počet vyhrazených prvků v jednotlivých ONU jednotkách. Princip ladění ONU laserem prostřednictvím OLT je zobrazen na obrázku 3.3. [18]



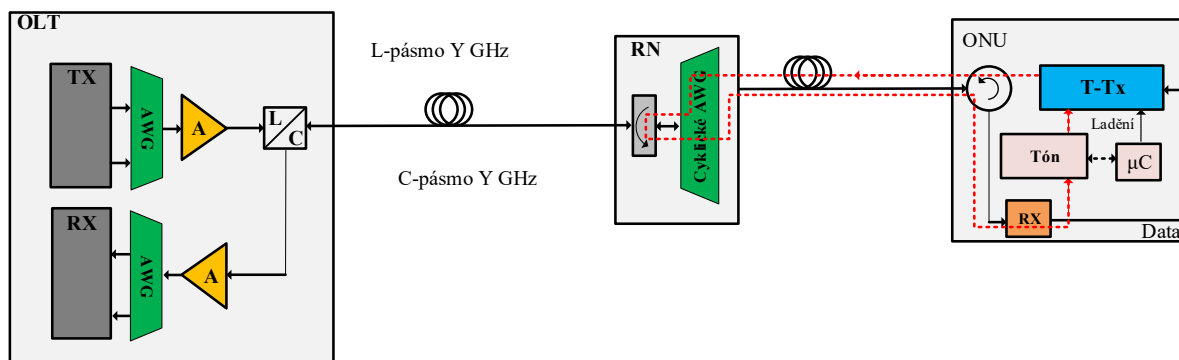
Obrázek 3.3: Ladění ONU jednotek prostřednictvím uzavřené smyčky zahrnující OLT a ECC [18]

Díky dvou-vlnově selektivním elementům AWG umístěných v OLT a RN je možné docílit ladění. Právě proto pomocí ladění založeném na řízeném laseru v ONU jednotkách je dosaženo příjmu maximálního výkonu v OLT jednotce. Příslušné řídicí příkazy lze posílat z OLT do ONU prostřednictvím ECC kanálu, který je založen např. na modulaci pilotního signálu. Díky možnosti využití širokopásmového přijímače lze ECC vždy nasadit na stávající systém.

3.4 WDM-PON s částečným reflektorem v RN

Alternativní scénář ladění je založen na ladění ONU jednotek s pomocí částečného reflektoru, který je umístěn ve vzestupném směru za AWG v RN, viz obrázek 3.4. Tento částečný reflektor má malý vliv na výkonnostní rozpočet, poněvadž hodnota vložného útlumu se pohybuje do 1 dB. Za účelem poskytnutí unikátního ladícího kritéria, ONU jednotky musí nyní přidat specifický pilotní signál k jejich signálu ve vzestupném směru. Příslušná část tohoto pilotního signálu může být použita v ONU jednotce pro přesné naladění.

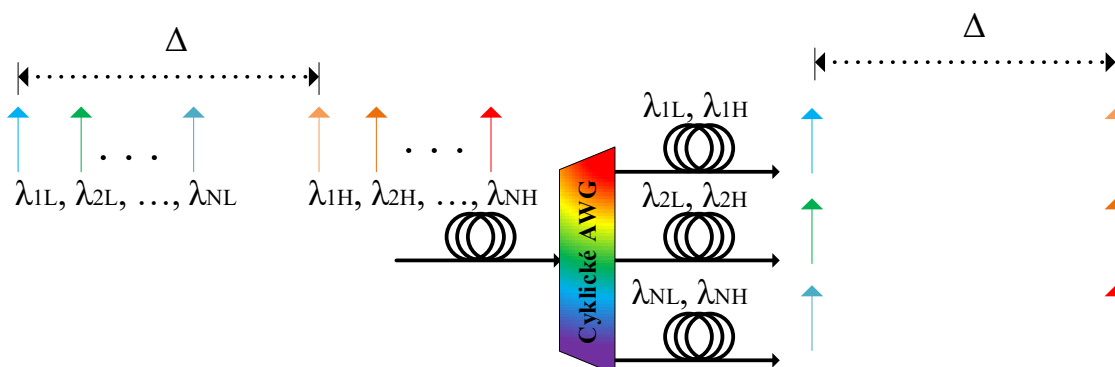
Oba ladící režimy, které jsou zde popsány mají společné, že nepotřebují dedikované vlnové ladění na každý vysílací laser v ONU jednotkách. Tyto prvky jsou nahrazeny sdíleným mechanismem pro naladění na požadovanou vlnovou délku, který může být implementován s nižšími náklady. Například částečný reflektor uvedený na obrázku 3.4 je část tohoto sdíleného vlnového ladění. Tímto způsobem mohou ONU vysílače snížit složitost a celkové náklady. Stojí za zmínku, že stejné vysílače nemají uplatnění ve většině ostatních aplikacích, protože postrádají ladící možnosti a také proto, že tyto vysílače jsou navrženy pro vzdálenosti nepřesahující 100 km. [18]



Obrázek 3.4: Ladění ONU prostřednictvím uzavřené smyčky zahrnující částečný reflektor v RN [18]

3.5 Cyklické AWG ve WDM-PON

Demultiplexní činnost cyklického AWG je zobrazena na obrázku 3.5, přičemž multiplexní funkčnost je získána invertováním směru šíření. Dva hřebeny rovnoměrně rozmístěných frekvencí vstupujících do společného portu, dvojice korespondujících vlnových délek ve dvou hřebenech oddělených frekvenční mezerou Δ je přítomna na každém výstupním portu. Každý pár vlnových délek je nakonec rozdělen nebo sloučen širokopásmovým WDM rozbočovačem v OLT a každém ONT. Charakteristické možnosti pro dvě pásma ve vzestupném a sestupném směru jsou C (1 530–1 565 nm) a L pásmo (1 565–1 625 nm).

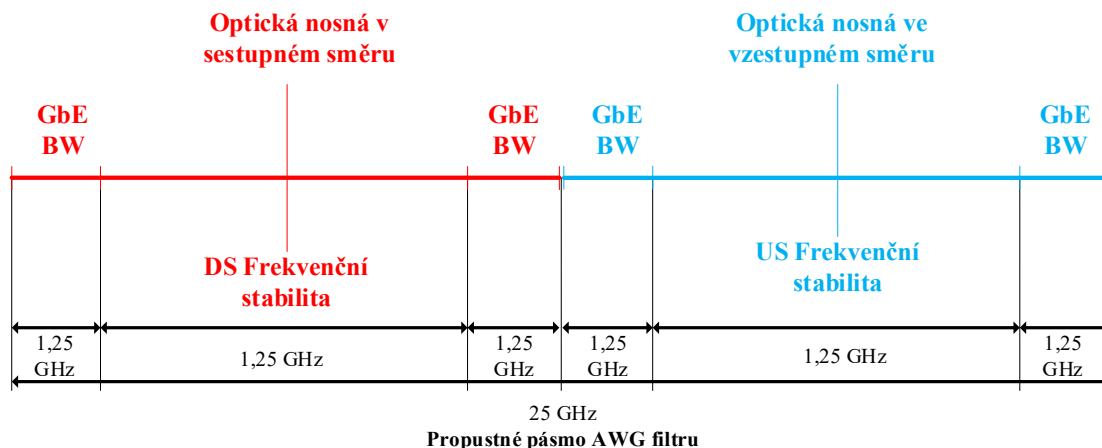


Obrázek 3.5: Cyklické AWG [18]

Díky jednoduché a přímočaré DWDM-PON síti není možné nasadit na jedno optické vlákno více než 80 až 96 obousměrných kanálů. Vzhledem k tomu, že může být vyžadováno více kanálů musí být zváženy způsoby rozšíření počtu. S přímočarým DWDM-PON zahrnující přímou detekci přijímačů s nejnižšími možnými náklady existuje několik způsobů rozšíření oblasti vlnových délek a snížení WDM mřížky do takové míry, kde je stále možné využít jednoduchý přímo detekční přijímač.

Snížení WDM mřížky na 25 GHz je považováno za možné. Je to způsobeno tím, že musejí být překonány pouze dva vícestupňové filtry, MUX a DMX. V PON sítích neexistuje žádný efekt násobku kaskádních filtrů, které by mohly mít značně užší propustný pás. Také ladění do 25 GHz je stále považováno za možné při přesné pasivní demultiplexaci na rozdíl od mřížky s 12,5 GHz roztečí. Pokud je bitová a frekvenční stabilita dostatečně nižší než šířka pásma AWG nedojde ke vzniku kolizí

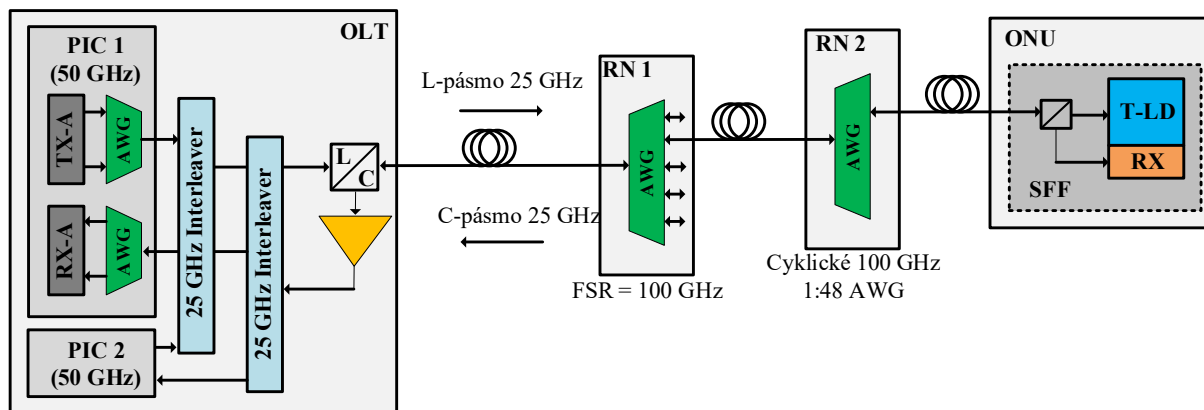
v sestupném směru a vzestupném směru přenosu signálu po průchodu skrz stejný port AWG, obrázek 3.6. [18]



Obrázek 3.6: DS a US frekvenční dělení v ONU jednotce [18]

3.6 Rozšíření počtu kanálů ve WDM-PON

Jedinou nevýhodou tohoto řešení je cena laditelných laserů, které v současné době omezuje jejich nasazení v FTTB aplikacích. Nicméně, levné laditelné lasery jsou ve vývoji a mohly by rozšířit použitelnost tohoto jednoduchého a efektivního schématu. Prosté rozšířené WDM-PON až na 25 GHz je zobrazeno na obrázku 3.7. Stejně jako dříve, PON je založeno na vysoce integrovaných PIC v OLT a levných laditelných laserech v ONU. V příkladu jsou uvedeny dvě vlnové délky rozteči vlnových délek 50 GHz a každá je proložena 25 GHz. [18]

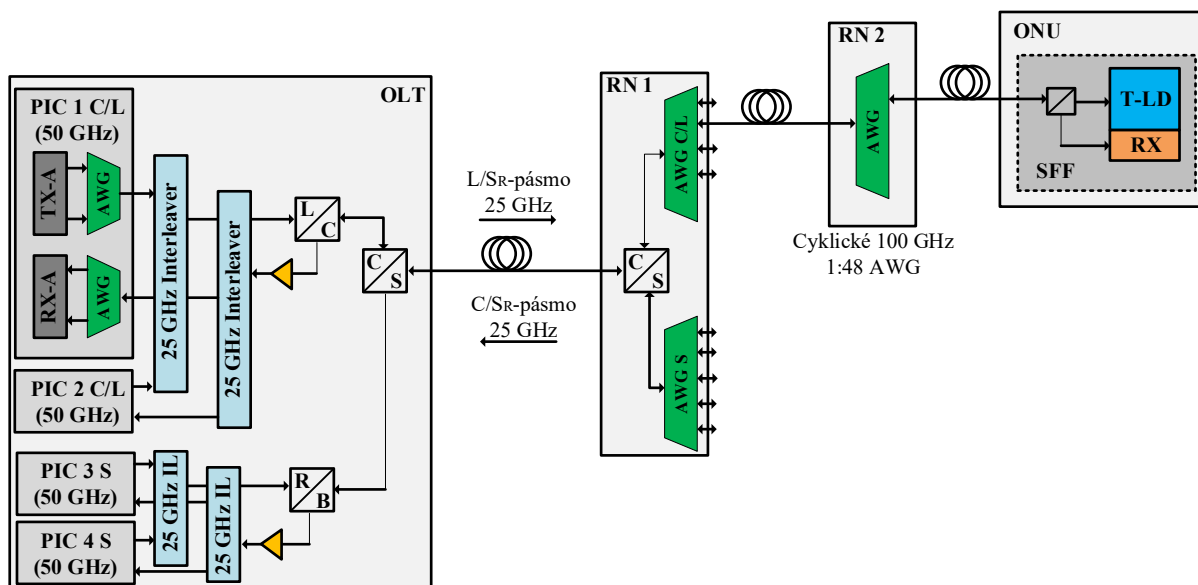


Obrázek 3.7: WDM-PON založená na laserech s 25 GHz roztečí pro rozšíření počtu kanálů [18]

Existují různé architektury kaskádových filtrů, můžou být použity IL s AWG nebo kaskádové AWG s vhodným FSR. Je také potřeba poznamenat, že systém koncepce podle obrázku 3.7 je stále založen na stejném PCS a levných laditelných laserech, jak bylo popsáno výše. Zatím žádné složité komponenty nebyly přidány. Tedy lze předpokládat podobnou cenu na jeden kanál. Další zvýšení počtu kanálů je možné díky rozšíření oblasti vlnových délek. V případě, že je počítáno s oblastí nízkého útlumu, pouze S pásmo a část rozšířeného L pásma (XL) je vhodným kandidátem.

Nicméně je třeba se XL pásma vyvarovat kvůli dramatickému zvýšení citlivosti na ohyb vláken. Tím se dostáváme k S pásma jako hlavnímu uchazeči pro rozšíření vlnového rozsahu.

Blokové schéma DWDM-PON alokace S, C a L pásma a také použití 25 GHz mřížky je zobrazeno na obrázku 3.8. Tato WDM-PON síť je založena na pásmových rozbočovačích (C/L, S/C a také červená/modrá v rámci S pásma) IL a také kaskádovitě AWG. Toto je jedna možná architektura s filtry a objekt dalšího výzkumu. [18]



Obrázek 3.8: WDM-PON založená na laserech s 25 GHz roztečí a S pásmem pro rozšíření vysokého počtu kanálů [18]

PON síť na obrázku 3.8 může ještě využít výše uvedených komponent, a tak mohou udržet náklady a sní spojené výhody. Nicméně s tak masivním DWDM-PON vznikají také první problémy. Kvůli několika stupňům obsahující rozbočovače, filtry a IL hrozí akumulování vložného útlumu. S levnými PIN přijímači a bez přidání jakékoliv prostředí pro rozšíření maximálního dosahu bude omezen výkonnostní rozpočet. Proto taková PON síť může vyžadovat výkonné vysílače, což je obecně možné alespoň s jedním laditelným předzesilovačem v OLT, a nebo s APD přijímači. Přesto je možné dosáhnout až teoretického maxima 384 kanálů (96 kanálů v C, L S/červené a S/modré pásmo). Další problémy se týkají laserové bezpečnosti a Ramanovými ztráty, či přeslechy. Laserová bezpečnost musí být pečlivě zvážena díky vysokému počtu kanálů. Mimo jiné, díky přísným omezením Bezpečnostní laserové třídy 1M může být nemožné využít v sestupném směru pro rozšíření dosahu Ramanové čerpání. Nicméně provoz s více než 300 kanály na vzdálenost delší 50 km je uskutečnitelný.

Ramanové čerpání musí být pečlivě zváženo díky širokému spektru pokrytých kanálů. Nicméně, může být prokázáno, že S pásmo je vhodné k Ramanově zesílení C/L pásem. Toto může být použito k DS čerpáním US. Takový přenos optického výkonu může být nutný, poněvadž DS v PON je slabší než US. To je způsobeno tím, že US může být jednodušeji zesílen pomocí koncentrovaných zesilovačů (např. EDFA) v OLT. Naproti tomu výkonové zesilovače není vhodné používat kvůli bezpečnostním omezením laserů. [18]

4 Vývoj sítí nových generací

4.1 Dnešní FTTH sítě

V průmyslovém významu je FTTH podmnožinou skupiny označované "fiber-to-the-x" (FTTX). "X" reprezentuje jakoukoliv širokopásmovou architekturu, ve které je v poslední míli použité optické vlákno a x označuje konkrétní polohu, kde dochází k ukončení optického vlákna. V roce 2014 bylo celosvětově nasazeno přes 100 miliónu připojení prostřednictvím FTTX a její rychlý růst pokračuje i nyní. Například v USA nasazování sítí FTTX relativně zaostává oproti komparaci s Asií. Nicméně více než 100 měst je aktuálně připojeno pomocí 1 Gbit×s⁻¹ širokopásmové sítě prostřednictvím Google Fiber a konkurenčních společností, převážně za použití FTTH technologie.

Po architektonické stránce je nejjednodušší přístup k dosažené FTTH tzv. "home-run", který připojuje každého koncového uživatele k ústředně jedním dedikovaným optickým vláknem. Tento přístup založený na hrubé síle je na jednu stranu technicky jednoduchý, ale na druhou stranu vyžaduje velký počet aktivních vysílačů a optických vláken, čímž razantně zvyšuje náklady na celkovou infrastrukturu. Důsledkem toho je, že drtivá většina implementací FTTH sítí je zapojena na pasivních optických sítích, u kterých pasivní optický splitter umožňuje díky jednomu vláknu z CO obsloužit více koncových bodů. Většina PON systémů nasazených do dnešní doby je založena na časově děleném multiplexu (TDM). V této architektuře je signál pocházející z optického linkového zakončení (OLT) v CO vyslán skrz splitter ve vzdáleném bodě (RN) a šířka pásma je sdílena mezi 32 a 64 uživateli (v některých případech dokonce až 128) prostřednictvím TDM protokolu.

TDM-PON systémy umožňují operátorům využít výhody statického multiplexování a efektivního využití šířky pásma v sítích poslední míle, čímž podporují výrazný komerční úspěch stávající G-PON (2,5 Gbit×s⁻¹ downstream a 1,25 Gbit×s⁻¹ upstream) a E-PON (1 Gbit×s⁻¹ symetrická kapacita). Standardy patří do skupiny sítí založených na TDM-PON architektuře, včetně vysokokapacitní sítě nového standardu IEEE s 10 Gbit×s⁻¹ přenosovou rychlostí. Přesto rozšiřování TDM-PON systémů pro očekávaný budoucí rozvoj přenosové rychlosti představuje řadu potencionálních problémů a výzev.

Vysílání v TDM-PON architekturách je efektivní z pohledu všesměrového vysílání TV signálu ke koncovým uživatelům v režimu nativního PON multicastu. Neposkytuje, ale žádnou výhodu v unicastovém provozu, který bude čím dál tím více dominantnější. Jednou z charakteristik TDM-PON systému je, že každé optické síťové ukončení (ONT) využívá pro provoz agregované připojení, které je sdílené mezi všemi členy PON sítě. Což způsobuje, že aktualizace daného PON systému na kapacitu s přenosovou rychlostí 10 Gbit×s⁻¹ je komplikované, neboť každý uživatel musí být vybaven tímto zařízením, aby byl schopen zpracovat 10 Gbit×s⁻¹, což z něj činí potencionálně drahou záležitostí.

Kromě toho vytvoření vysokorychlostního OLT v CO zpětně kompatibilního se staršími ONT jednotkami mezi uživateli není jednoduchá záležitost. V důsledku toho standard pracující s přenosovou rychlostí 10 Gbit×s⁻¹ využívá mírně odlišné přenosové vlnové délky, 1270 nm pro upstream a 1577 nm pro downstream oproti 1310, resp. 1490 nm využívaných ve standardu EPON a GPON, čímž umožňují nasazení ONU a OLT jednotek podporující 10 Gbit×s⁻¹ na stávající optickou infrastrukturu využívající pomalejší architektury EPON a GPON. Zvýšení rychlosti TDM-PON systémů desetinásobně bude rovněž vyžadovat desetinásobný výkonový rozpočet, a také tyto systémy

budou muset překonat výzvy v podobě FEC. Mimo jiné se při těchto rychlostech výrazně zvýší chromatická disperze.

Úskalím TDM-PON systémů je ve vzestupném směr přenosu dat. Jakmile se začne využívat více ONT koncových jednotek uživatelů, tak všechny začnou vysílat, do jedné OLT jednotky v ústředně. Tudíž TDM-PON musí podporovat vysokorychlostní shlukovitý režim. OLT přijímač začne v CO rychle synchronizovat časování a rychle upravovat k přijetí paketových shlukovitých režimů ve vzestupném směru. Takovéto OLT přijímače jsou schopné zvládnout vysokorychlostní shlukovitý režim a jsou náročné na realizaci. Streamování videa ve vzestupném pásmu vyžaduje relativně malou šířku pásma a stávají se v širokopásmové aplikaci dominantními. Počet asymetrických PON standardů byl navržen pro usnadnění implementace upstreamu a snížení ceny systému pro další generace pasivních optických sítí.

4.2 WDM-PON

Díky složitému rozšíření TDM-PON sítí komunita aktivně zkoumá alternativní přístupy. Jeden z alternativních přístupů je WDM-PON, který připojuje každého uživatele pomocí dedikované vlnové délky prostřednictvím vlnovodného splittru ve vzdáleném bodě (RN). Z hlediska přenosu jsou WDM-PON mnohem více škálovatelnější než TDM-PON, protože každé uživatelské optické síťové zakončení ONT může pracovat s vlastní přenosovou rychlostí na rozdíl od TDM-PON, které vyžaduje, aby každý koncový uživatel pracoval na přenosové rychlosti stejné v celé síti.

Například 40 kanálový WDM-PON systém s přenosovou rychlostí $1 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ na kanál má celkovou PON kapacitu $40 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$, zatímco v TDM-PON má každý koncový uživatel agregovanou kapacitu. Kromě toho, WDM-PON nepracují ve shlukovém režimu, což z technického hlediska velmi zjednodušuje vysílače. Menší vložný útlum WDM splittru značně snižuje nutný výstupní výkon laserů, citlivost přijímačů a dynamický rozsah. Přesto mají WDM-PON systémy vlastní problémy. Jeden z hlavních problémů je cena komponent. Pro efektivní využití optického spektra uvnitř vlákna WDM-PON vyžadují hustý multiplex WDM (DWDM) a DWDM lasery, termoelektrické chlazení a TEC řadiče pro zajištění stability vlnových délek. PON lasery jsou konstruovány v nízkonákladových "to-can" pouzdrech podobných jako u tranzistorů. Systém, který konstruuje jak laser, tak i TEC řadič do jednoho "to-can" pouzdra může pomoci k vytvoření rentabilního WDM-PON. Kromě toho dostupnost nízkonákladových laserů může hrát důležitou roli při realizaci praktických WDM-PON systémů, neboť každý koncový uživatel ONT potřebuje vlastnit laditelný laser.

4.3 TWDM-PON architektury

Možná, že největší nevýhoda WDM-PON systémů tkví v tom, že vyžadované optické vlákna nejsou kompatibilní s tradičními TDM-PON systémy aktuálně nasazenými v praxi. Důsledkem toho je, že $40 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ standard sítí nové generace navržený ITU-T pod názvem NG-PON2, kombinuje TDM a WDM do jedné TWDM architektury, aby byla dosažena kompatibilita s již existující infrastrukturou založenou na bázi časového multiplexu TDM-PON.

NG-PON2 uvádí první krok, aby WDM byla zavedena do PON standardu ke zvýšení kapacity PON sítí. Jelikož přenos sériového $40 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ signálu pouze na bázi TDM je velice obtížné, proto NG-PON2 standard využívá 4 paralelních $10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ WDM vysílačů v OLT jednotce k dosažení agregované PON kapacity o přenosové rychlosti dosahující $40 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$. Tyto 4 vlnové délky jsou

multiplexovány a demultiplexovány pomocí $4 \times 10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ WDM pole vysílačů v OLT a všechny vlnové délky jsou vysílány k ONT koncových uživatelů, kde každé zařízení je vybaveno $10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ přijímačem/vysílačem. Aby byly vlnové délky ONT agnostické jsou zde využity laditelné filtry k vybrání správné vlnové délky vysílané OLT jednotkou v sestupném směru. Stejně jako v případě WDM-PON systémů, každá ONT jednotka potřebuje být vybavena laditelnými lasery. Ačkoliv NG-PON2 se propagují jako $40 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ PON sítě, ONT jednotky koncových uživatelů mohou pracovat maximálně s $10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$, což je podstatně více, než dostatečné pro dnešní širokopásmové aplikace.

Filozofie designu NG-PON2 má však několik problémů. Za prvé, cíle nového standardu podporují víceúrovňové rozdělení a vysoký rozdělovací poměr, až 1024 uživatelů připojených do jednoho CO, efektivně využít obrovskou šířku pásma, kterou disponují NG-PON2 a snížit náklady systému díky lepšího sdělení drahé optiky využitě v OLT, díky snížení počtu optických vláken potřebných pro připojení k CO. Pouze některé PON systémy mají v současnosti takto velký rozdělovací poměr. Kromě toho k zajištění velmi vysokého rozdělovacího poměru jsou potřeba v OLT jednotce přijímače pracující v shlukovém režimu s velmi vysokým dynamickým rozsahem – větším než 20 dB.

Druhým problémem je potencionální velmi vysoký výkonový rozpočet potřebný pro implementaci NG-PON2 sítí. NG-PON2 standard specifikuje výkonový rozpočet až na 35 dB mezi OLT a ONT jednotkami, a to nepočítá s útlumy způsobené WDM multiplexorem uvnitř OLT a laditelnými filtry v ONT optických modulech. V důsledku toho lasery s velmi vysokým vysílacím výkonem a přijímače s vysokou citlivostí budou zapotřebí. Což signifikantně ovlivní cenu celkového systému i přesto, že tyto technologie jsou dostupné, a také podpora vysokého poměru rozdělení zatíží výkonový rozpočet ještě více.

4.3.1 Může TWDM-PON být rentabilní?

V dnešní době technologie optických komponentů zatím nedosáhla bodu, ve kterém by implementace NG-PON2 byla dohledné době ekonomickým řešením. Zvláště díky tomu, že neexistuje v současnosti reálná poptávka po těchto systémech. Krok z G-PON na $10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ TDM-PON byl postupný, protože optické systémy jsou docela podobné na rozdíl od rychlosti optických vysílačů. Nicméně, v přechodu od současného $10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ TDM-PON k NG-PON2 je struktura optických vysílačů mnohem komplexnější a celková složitost je stává exponenciálně vyšší. Malé, nízko-útlumové a nízko-výkonové laditelné filtry vyžadované pro ONT jednotky koncových uživatelů v NG-PON2 systémech nejsou jednodušší na výrobu než polovodičové laditelné lasery, které většinou vychází z monolitické struktury. V dlouhodobém horizontu inovace a vývoj fotonických integrovaných obvodů mohl vyřešit tyto problémy.

NG-PON2 vytváří také problém z pohledu MAC protokolu, který spravuje přidělování šířky přenosového pásma PON sítí jednotlivým ONT jednotkám. NG-PON2 přidává další vrstvu pro správu vlnových délek, zatímco současně udržuje složité řízení dynamického časového managementu a přenos v shlukovém režimu. Ladění přenosové rychlosti trvá v řádech milisekund v laserech, zatímco u filtrů používaných v NG-PON2 činí velmi obtížnou implementaci z ekonomického hlediska, především rychlé přepínání vlnových délek na paketové úrovni. Koordinace vlnových délek s časovými sloty dohromady přidává na složitosti NG-PON2 dynamický algoritmus alokace šířky pásma DBA.

Na fyzické vrstvě činnost shlukového režimu WDM laserů způsobuje přechodný posun vlnové délky, protože náhlý vstupní proud do laseru zahřívá jeho strukturu, ledaže je použit externí modulátor, který zvyšuje cenu a optický útlum. Posun zvyšuje laserový budicí proud a laserový výstupní výkon může být velký 20 až 30 GHz s časovými konstantami v řádech milisekund. Takový posun nezpůsobuje pouze omezení přijímací citlivosti v OLT, ale také přeslech mezi ostatními kanály v širokopásmovém vysílání TDM-PON sítí. Čistá WDM-PON síť bez TDM překrytí, na druhou stranu nevyžaduje činnost shlukového režimu a také nevykazuje žádné problémy. Tyto atributy mohou z WDM-PON vytvořit mnohem jednodušší cestu k realizaci a rozšíření v delším časovém horizontu navzdory současné preference průmyslu pro TWDM-PON architekturu.

4.3.2 Vyhlídka pro PON systémy nové generace

Přístupové sítě jako systémy ve sdělovací technice jsou velmi cenově citlivé. Ve světě sdělovací techniky je obvykle nutné desetinásobné zvýšení výkonu, aby se odůvodnilo dvojnásobné zvýšení nákladů na nasazení systémů nové generace. NG-PON2 nemusí toto kritérium splňovat: optická vrstva NG-PON2 není pouze složitá na papíře, ale ukázala se být velmi složitá pro implementaci prostřednictvím aktivit v oblasti výzkumu a vývoje v posledních třech až čtyřech letech.

V blízké budoucnosti 10 Gbit×s⁻¹ PON sítě by měly poskytovat adekvátní šířku pásma s cílem uspokojit stávající poptávku, takže není bezprostřední důvod pro potřeby dynamicky měnící zatížení vlnové délky s dalšími náklady a složitostmi, které by to přineslo. Tato skutečnost je základem rozhodnutí ITU-T k vytvoření XGS-PON (10 Gbit×s⁻¹ symetrická PON s jednou vlnovou délkou) standardu jako "počáteční fáze" NG-PON2.

Pohled nad 10 Gbit×s⁻¹ byl odůvodněn standardizační organizací IEEE, která představila další generaci E-PON NG-PON. Se studiemi začala v listopadu 2015 a počátečním příkladem bylo využití cílenou aplikací v podniku a buňkové páteři. Začíná na jedné vlnové délce o přenosové rychlosti 25 Gbit×s⁻¹, implementovanou s duo-binární modulací ke snížení požadavku na šířku přenosového pásma a omezení zapříčiněná disperzí. Byly také navrženy další modulační metody jako je PAM-4. Hlavní myšlenka je uvedena v řízení šířky pásma signálu, takže 10 Gbit×s⁻¹ optika a může být použita pro přenos, čímž potencionálně usnadní cestu inovací současných technologií.

4.3.3 Role nových aplikací

Je zajímavé si povšimnout, že ačkoliv standardy pro 10 Gbit×s⁻¹ PON systémy byly dokončeny v roce 2009 a byly nasazený pro FTTH, tak v některých asijských zemích se masivní rozšíření 10 Gbit×s⁻¹ PON FTTH nikdy neuskutečnilo. Celou situaci způsobila poptávka, která po tak velké šířce pásma nebyla výrazná a podle IEEE poskytované kapacity současných G-PON nebo EPON technologií by měly být dostačující až do roku 2020. Streamování videa zůstává zdaleka největším konzumentem šířky přenosového pásma a HD video ve formátu 1080p spotřebovává jen asi 10 a 15 Mbit×s⁻¹ šířky pásma. To znamená, že 2,5 Gbit×s⁻¹ šířka pásma v sestupném směru v technologii G-PON, která je sdílena mezi 32 uživateli ve standardním nasazení je více než dostatečná pro podporu nynějšího video streamování. [10]

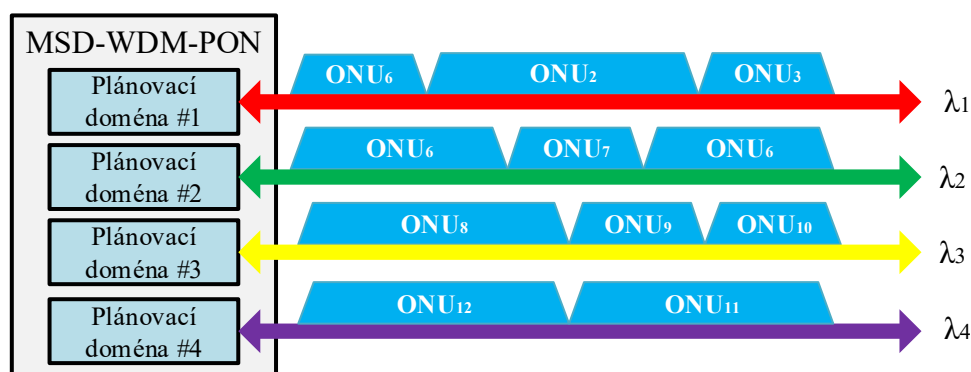
4.4 Hybrid PON

Hybridní PON systémy poskytují skupině ONU jednotek a uživatelům připojených k těmto ONU jednotkám alespoň jeden pár vlnových délek, jeden pro sestupný a druhý pro vzestupný směr

přenosu dat, sdílený mezi ONU jednotky pomocí časově děleného multiplexu TDM. Tímto způsobem je mezi OLT jednotkou a konkrétní skupinou ONU jednotek vytvořeno spojení typu P2MP. V závislosti na způsobu jakým skupina ONU jednotek sdílí přiřazení vlnových délek se hybridní PON systémy dále klasifikují do tříd MSD-WDM-PON, SSD-WDM-PON a WA-PON. Následující kapitole jsou tyto třídy vysvětleny pro vzestupný směr přenosu dat.

Přenosy dat ve vzestupném směru od ONU jednotek, které sdílí přiřazené vlnové délky pomocí časově děleného multiplexu TDM mohou kolidovat z OLT přijímačem. Je potřeba řídicího protokolu k určení vzestupného provozu k předejití možným kolizím. V sestupném směru je přenosové médium nepřetržitě dostupné pro přenos, neboť OLT je jediné zařízení, kterému je povolen přenos dat směrem k ONU jednotkám. V průběhu let se objevilo mnoho různých návrhů přístupových protokolů s různými generacemi EPON a GPON reprezentující nejpůlárnější P2MP protokoly pro řízení přístupu na optické médium.

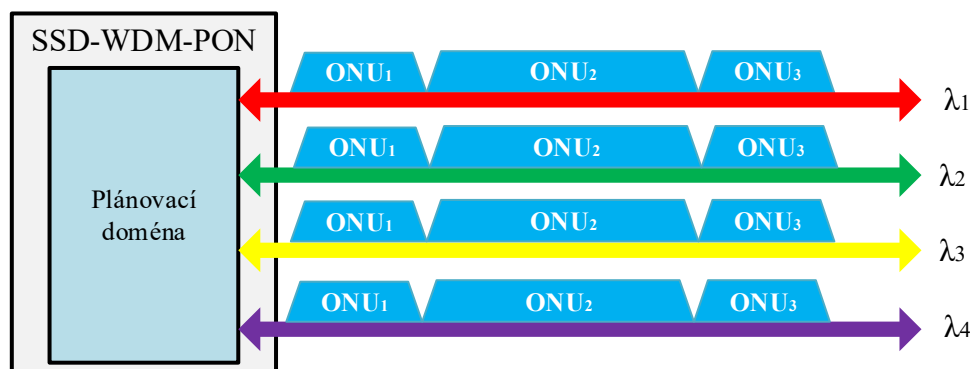
4.4.1 MSD-WDM-PON



Obrázek 4.1: Vzestupné datové kanály v MSD-WDM-PON

V MSD-WDM-PON systému vzestupné a sestupné kanály vlnových délek jsou přiřazeny buď dynamicky nebo staticky ke skupině ONU jednotek. Ve vzestupném směru OLT pak garantuje přístup k přiřazeným kanálům vlnových délek ke konkrétní ONU umožňující ONU jednotce vysílat její data zařazená ve frontě. Trvání tohoto přístupu ke kanálu ve vzestupném směru je garantováno přiřazením ONU na základě činnosti DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) mechanismu. Žádné další ONU sdílející stejný kanál vlnové délky není umožněno vysílat během stejného časového okna. V MSD-WDM-PON každá ONU jednotka vysílá pouze na jedné vlnové délce v daném časovém okně, viz obrázek 4.1. OLT jednotka je jediné zařízení s povoleným přístupem na kanál vlnové délky v sestupném směru a vysílá data bez potřeby řídicího protokolu.

4.4.2 SSD-WDM-PON



Obrázek 4.2: Vzestupné datové kanály v SSD-WDM-PON

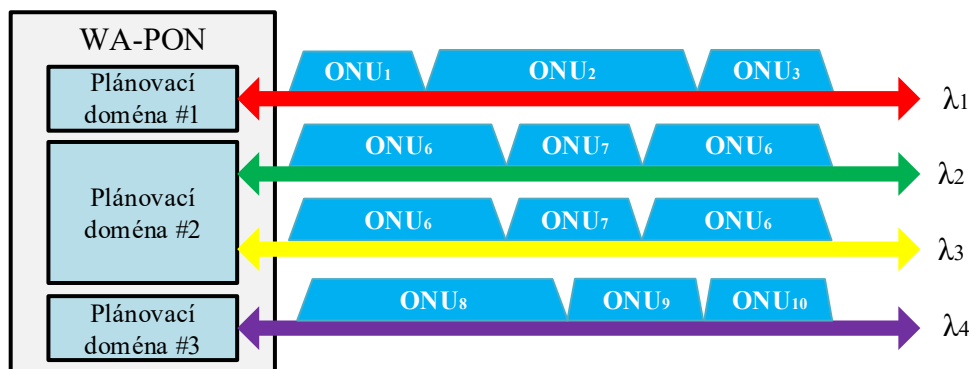
V SSD-WDM-PON jsou všechny vzestupné a sestupné kanály vlnových délek přístupné všem ONU jednotkám při dané OLT jednotce. Ve vzestupném směru OLT garantuje přístup všem dostupným kanálům vlnových délek ke konkrétním ONU jednotkám, což umožňuje vysílat její data uložená ve frontě. Trvání tohoto přístupu všem kanálům vlnových délek je uděleno dané ONU jednotce na základě činnosti DBA protokolu. Žádné další ONU jednotce není povoleno vysílat během stejného časového okna. V SSD-WDM-PON každá ONU jednotka současně vysílá na všech vlnových délkách, viz obrázek 4.2. OLT je jediné zařízení s přístupem na kanál vlnových délek v sestupném směru a vysílá data na všech vlnových délkách bez nutnosti dalšího řídicího protokolu.

4.4.3 WA-PON

Ve WA-PON systémech je více než jeden kanál vlnových délek ve vzestupném a sestupném směru přiřazen buď dynamicky nebo staticky ke skupině ONU jednotek k dané OLT jednotce. Přidělení kanálu vlnových délek ve vzestupném a sestupném směru k dané ONU jednotce se může v čase dynamicky měnit na základě řízení OLT jednotkou. OLT jednotka může měnit počet sestupným a/nebo vzestupných kanálů vlnových délek přiřazovat k dané ONU. Jejich umístění v dostupné vlnové mřížce záleží na konfiguraci vybrané operátorem, plánování kapacity a dalších faktorech.

Ve vzestupném směru OLT uděluje přístup k přiřazeným kanálům vlnových délek k dané ONU umožňující vysílat její data uložená ve frontě. Trvání tohoto přístupu je závislé na funkci DBA mechanismu. Další ONU jednotkám není umožněno vysílat na stejné vlnové délce během stejného časového okna. Ve WA-PON každá ONU jednotka vysílá na její přiřazené vlnové délce současně s dalšími ONU jednotkami, viz obrázek 4.3.

OLT je jediné zařízení s přístupem na kanál vlnových délek v sestupném směru a vysílá data na všech vlnových délkách bez nutnosti dalšího řídicího protokolu. Aby se dosáhlo plné flexibility agilních vlnových délek v PON, čili WA-PON musí ONU jednotky podporovat laditelné vysílače a přijímače, aby bylo dosaženo zpracování signálů na různých vlnových délkách vybraných OLT jednotkou.



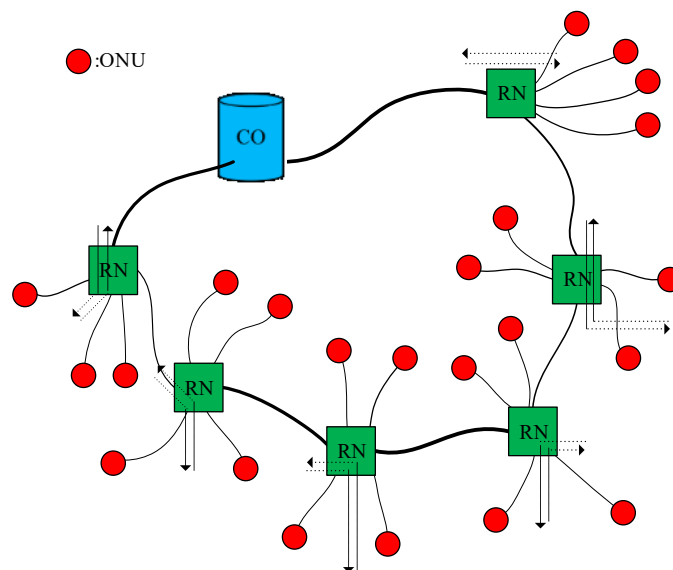
Obrázek 4.3: Vzestupné datové kanály ve WA-PON

4.5 Hybridní síť SUCCESS a její architektura

Název architektury SUCCESS vznikl na Standfordské univerzitě na základě zkratky Strandford University aACCESS. Řadí se do kategorie hybridních sítí nové technologie, jejichž platforma vychází z WDM/TDM. Základem je přesun z aktuálních sítí TDM-PON na síť budoucnosti DWDM-PON. Opírá se o kolektorový kruh propojující nové DWDM-PON síť, ale i existující TDM-PON. Výhodou je poskytnutí větší bezpečnosti a schopnost obnovení vytvořením sítě, která je odolnější vůči výpadku napájení než klasické PON topologie. SUCCESS architekturu využívají domácí i obchodní uživatelé v rámci stejné sítě. Pro ekonomičnost SUCCESS architektury jsou využity ONU jednotky, které nepotřebují prvky chlazení, NxN AWG směrovače, které zdvojnásobí podporu počtu ONU jednotek v síti a OLT využívá přijímače a lasery.

Dnešní doba nahrává existenci optickým přístupovým sítím nové generace, které se stávají součástí reality. Předpokladem je, že právě konvenční PON síť založené na bázi TDM se stromovou typologií budou vévodit. Podstatnou se stává síť, která podporuje uživatele na PON bez modernizace jejich CPE a právě SUCCESS architektura umožňuje efektivní a především ekonomické řešení pro novou generaci přístupových sítí bezproblémovým způsobem. Architekturu SUCCESS znázorňuje obrázek 4.4, kde je možné shlédnout jedno-vláknový kolektorový kruh s připojenými RN.

Kruhy spojují vzdálené uzly, které jsou základem hvězd. ONU jednotky připojené k RN jsou ze západní i východní strany kruhu. V západní části vysílají a přijímají komunikaci se západní stranou OLT a z východní strany s východní stranou kruhu OLT. Rovněž spojení bod-bod se pojí s každým RN a OLT a v kolektivním kruhu neexistuje žádná vlnová délka, která by byla opětovně využita. Přerušení zaznamenají vzdálené uzly RN, které uvedou ztrátu signálu a změnu směrovou orientaci. Vzdálené uzly mohou obsahovat buď pasivní rozbočovače (slučovače), a tím pádem jsou ONU jednotky připojené k RN a využívají pro vysílání v sestupném směru jednu vlnovou délku z DWDM rozsahu nebo AWG směrovač, kdy je každá ONU jednotka vyňatá pro komunikaci s OLT, se kterou využívá vlastní vlnovou délku z DWDM rastu.

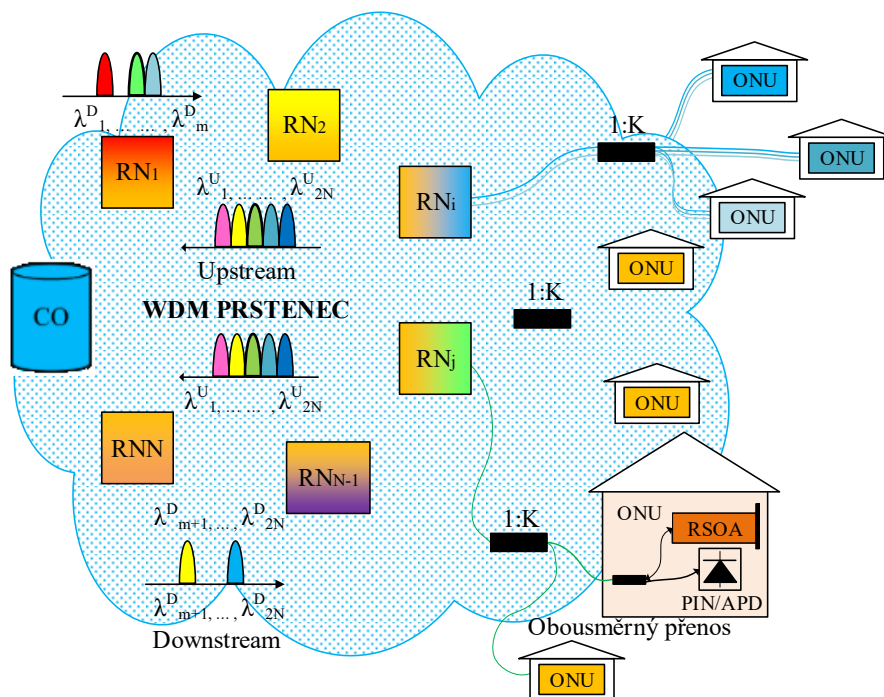
Obrázek 4.4: *Architektura SUCCESS [19]*

Vložený útlum AWG směrovače činí přibližně 6 dB bez ohledu na počet portů a AWG s více než 8 porty je potřeba nasadit, aby došlo k lepšímu výkonu v komparaci s pasivními rozbočovači. Rozdělení datového provozu je vnímáno jako pozitivum hvězdicové topologie CWDM na bázi TDM a DWDM na bázi WDM. Ke snížení počtů vysílačů v OLT se využívají laditelné součásti. Úkolem laditelných lesků je vytváření sestupného provozu, tak i nepřetržitých vln (CW) pro modulování ONU. V porovnání s ostatními architekturami, které obsahují vláknový kruh, dvě sady de/multiplexorů pro plně duplexní komunikaci a dvě sady zdrojů, je tento návrh ekonomičtější a snižuje náklady na nasazení. [19][21]

4.6 SARDANA

Zkratka SARDANA vychází z názvu „The scalable advance ring-based passive dense access network architecture“. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, tak výzkum informačních a komunikačních technologií se specializuje na vývoj nových síťových architektur a technologií, které se zaměřují na zvýšení počtu připojených uživatelů, bezpečnosti, přenosové kapacity, integraci služeb a dalších klíčových funkcí. Přesně tyto cíle jsou jádrem Evropského projektu SARDANA, který směřuje k vytvoření budoucí access-metro konvergované sítě se zřetelem na prvotní a údržbové náklady či integraci se standardy.

Základem je kombinace nové generace sítě 10G GPON s metropolitní sítí WDM. Zařízení 10G GPON je realizováno prostřednictvím OLT a ONU a WDM má za úkol přenos a zabezpečení. SARDANA usiluje o konektivitu více než 1 000 ONU jednotkám a vzdálenost 100 km při 10 Gbit/s⁻¹ přenosové rychlosti.

Obrázek 4.5: *Architektura SARDANA[2]*

Jedná se o řešení pro síť a infrastrukturu nasazenou především na Gigabit PON a do budoucna na 10G PON systémy. Sardana je schopná řešit metropolitní architekturu založenou na WDM kruhu a přístupovou architekturu založenou na TDM stromové nebo bod-bod topologii a to na základě toho, že Sardana ONU jednotky jsou schopny přijímat DSL datový provoz.

Na obrázku 4.5 je zobrazeno koncové rozdělení architektury, ve kterém je optické připojení uživatelů pomocí ONU jednotek zastoupeno архитектурou bod-bod nebo PON topologií. Ústředna OLT PON sítě se nachází na hranici metro-access. Ethernetový standard slouží k připojení rozhraní OLT do metropolitní sítě. Datové toky jsou shromažďovány na výstupu případného kruhu metro-access a metro-core a dále vedou k přístupovým bodům. Uvedená síť může být využita na rozdělení obyvatel, hustotu obyvatel, různé geografické a funkční scénáře jako je integrační kolektor dalších přístupů pro xDSL.[2][21]

5 Infrastruktura laboratoře

Praktická část diplomové práce navazuje na bakalářskou práci pod názvem *Měření a testování integrované vláknové optické sítě*. V rámci praktické části bylo provedeno testování dostupných polovodičových zesilovačů a jejich implementace do integrované optické sítě, kterou tvoří dvě pasivní optické sítě s rozdílným přístupem k médiu. První PON síť je založena na časově děleném multiplexu a pracuje na standardu EPON2, neboli GEPON s maximální přenosovou rychlostí $1,25 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ a druhá síť tvořící integrovanou síť je WDM-PON, konkrétně standard s hustým vlnovým multiplexem DWDM-PON. Kombinací těchto dvou různých sítí vzniká speciální hybridní pasivní optická síť, přičemž v rámci této diplomové práce již nelze hovořit o pasivní síti, nýbrž aktivní, neboť do sítě byly implementovány aktivní prvky v podobě polovodičových zesilovačů.

Mimo samotnou implementaci polovodičových zesilovačů do integrované optické sítě byla provedena celá řada dílčích částí, které byly nutné před finálním měřením integrované sítě. Mezi tyto dílčí části patří budování a propojení laboratoří v rámci budovy Nová FEI pomocí optické a ethernetové sítě, měření útlumu pasivních prvků a optických tras, sestavení optické trasy, aktualizace softwaru OLT jednotky a řada dalších.

5.1 Aktivní prvky hybridní fotonické sítě

V následujících kapitolách bude proveden rozbor všech využitých aktivních technologií ve formě jednotlivých PON systémů včetně konfigurace.

5.1.1 Technologie EPON2

Technologie EPON2 je reprezentována prvky od firmy Allied Telesyn v podobě OLT jednotky iMAP 9102 a koncových ONU jednotek AT-ON 1000.

5.1.1.1 iMAP 9102

Jedná se o multiservisní platformu poskytující širokou škálu funkcí pracující na druhé vrstvě modelu ISO-OSI s ethernetovými rámci. OLT jednotka dostupná v laboratoři EB316 je osazena čtyřmi kartami. Hlavní karta obstarává řídicí funkce a správu samotné OLT jednotky. Obsahuje konzolový a řídicí port pro místní, resp. vzdálenou správu a dva porty pro připojení konektivity. Dále jsou zde karty ADSL24B–ADSL Annex B pro připojení uživatelů prostřednictvím DSL linky a FX20BX-20 sloužící pro optické komunikace v režimu spojení bod-bod. Poslední osazenou kartou v OLT jednotce je karta typu TN-118B EPON2, která obsahuje dva sloty pro umístění SFP modulů podporující standard EPON2. Konkrétní parametry SFP modulu jsou uvedeny v tabulce 5.1. [1]

Tabulka 5.1: *SFP modul standardu EPON2 a jeho parametry*[7]

Režim: RX		Režim: TX	
Rozsah pracovních vlnových délek [nm]	1 260 – 1 360	Rozsah pracovních vlnových délek [nm]	1 480 – 1 500
Fotodetektor – citlivost	Min: – 30 dBm Max. – 10 dBm	Výstupní optický výkon	Min: – 30 dBm Max. – 2 dBm

Konfigurace iMAP 9102

Konfigurace OLT jednotky probíhá v prostředí příkazového řádku, ke kterému bylo přistoupeno pomocí konzolového portu typu RJ 45 v řídicí kartě a USB portu v dostupném PC, k čemuž byl využit USB emulátor. K připojení do rozhraní příkazového řádku byl využit klient PuTTY 0.63. Jenž byl nastaven dle následujících parametrů:

- Bitová rychlost: 9600
- Datové bity: 8
- Stop bit: 1
- Parita: Ne
- Řízení datového toku: Ne
- Číslo COM portu: Dle použitého USB portu

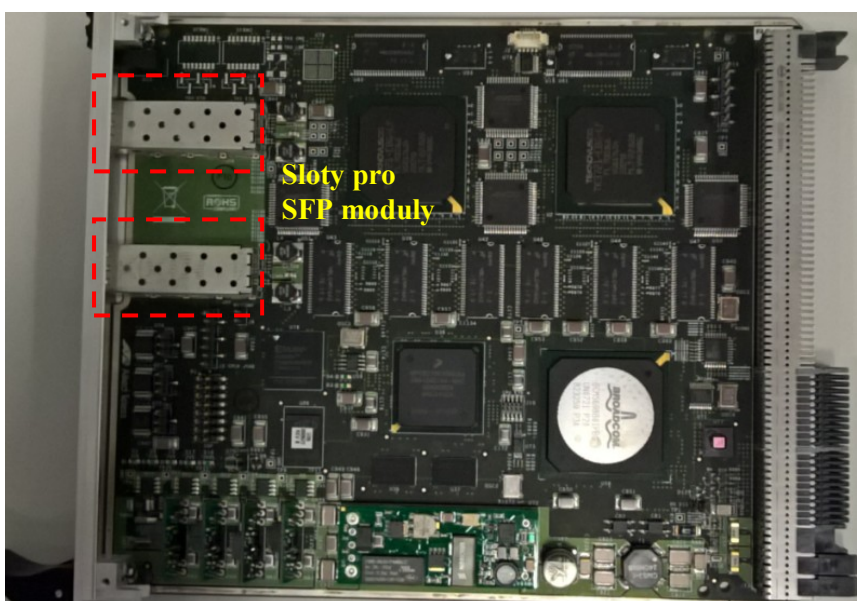
Následně po úspěšném připojení bylo nutné zadat přihlašovací údaje v následujícím znění:

- Uživatelské jméno: officer
- Heslo: officer

Dále jsou uvedeny využitá příkazy a jejich popis:

- Zobrazení čísla rozhraní EPON2 karty se SFP modulem:
 - **show interface**
- Zobrazení všech koncových jednotek ONU:
 - **show onu**
- Zaregistrování nové koncové jednotky AT-ON 1000 systému EPON2:
 - **create onu <jméno ONU jednotky> onuid <jedinečný identifikátor> interface <číslo portu SFP modulu EPON2> macaddress <MAC adresa konkrétní ONU jednotky> [1]**

Na obrázku 5.1 je zobrazena karta EPON2, kde lze v levé části vidět dvě rozhraní pro SFP moduly pracující ve standardu EPON2.



Obrázek 5.1: Karta EPON2

5.1.1.2 AT-ON-1000

Jedná se o koncovou jednotku technologie EPON2, jenž je navržena pro poskytování datového spojení s maximální přenosovou rychlostí $1 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$, což z ní dělá ideálního kandidáta pro nasazení v podmínkách vyžadující velkou šířku pásma. Je osazena jedním metalickým portem typu RJ45 o standardu 10/100/100bT LAN a optickým portem s konektory SC/PC. V následující tabulce 5.2 jsou uvedeny parametry uváděné výrobcem:

Tabulka 5.2: *Optické parametry AT-ON 1000 [1]*

Režim: RX		Režim: TX	
Rozsah pracovních vlnových délek	1 490 nm	Rozsah pracovních vlnových délek	1 310 nm
Fotodetektor – citlivost	Min. -3 dBm Max. -26,5 dBm	Výstupní optický výkon	Min: 1 dBm Max. 4 dBm

5.1.2 Technologie WDM-PON

5.1.2.1 EAST 1100

Jedná se o OLT jednotku EAST 1100 systému DWDM-PON od firmy LG Nortel ve 3. verzi spadající do kategorie sítí nové generace využívající hustého vlnového multiplexu s roztečí mezi jednotlivými kanály 100 GHz v pásmech C a L. EAST 1100 umožňuje poskytovat podporu služeb na velmi vysoké úrovni, ať už se jedná o sítě spadající do kategorie páteřních, podnikových či rezidenčních. Přičemž bez omezujících faktorů, které jsou na konvenčních sítích využívající časového multiplexu TDM.

Jednotka EAST 1100 release 3 je provedena v platformě o velikosti 10 U obsahující řídicí kartu MC, dvě karty typu L2/L3 SW/N1 a služební karty SI v celkovém počtu 8 slotů. Do SI slotů lze umístit PI karty, kde každá umožňuje provozovat až 32 kanálů s $100 \text{ Mbit} \times \text{s}^{-1}$ připojením na kanál. Čili plně osazená OLT jednotka je schopná poskytovat konektivitu až 256 koncovým účastníkům do vzdálenosti 20 km. Vzdálenou správu systému lze provádět v grafickém prostředí prostřednictvím softwaru EMS nebo při lokální správě pomocí konzole v příkazovém řádku, který slouží převážně pro inicializační nastavení.

Jednotka EAST 1100 v sestupném směru vysílá v pásmech C a L, přičemž v pásmu C je vysíláno širokospektrální záření BLS (Broadband Light Source) jenž plní funkci ladicího signálu, na kterém následně vysílají koncové jednotky ve vzestupném směru přenosu dat. V druhém C pásmu v sestupném směru již OLT jednotka vysílá příspěvkové kanály na 32 různých vlnových délkách z roztečí mezi jednotlivými kanály 100 GHz. [13]

Konfigurace EAST 1100

Pro konfiguraci OLT jednotky EAST 1100 byl využit software EMS, kde po spuštění byly zadány následující přihlašovací údaje:

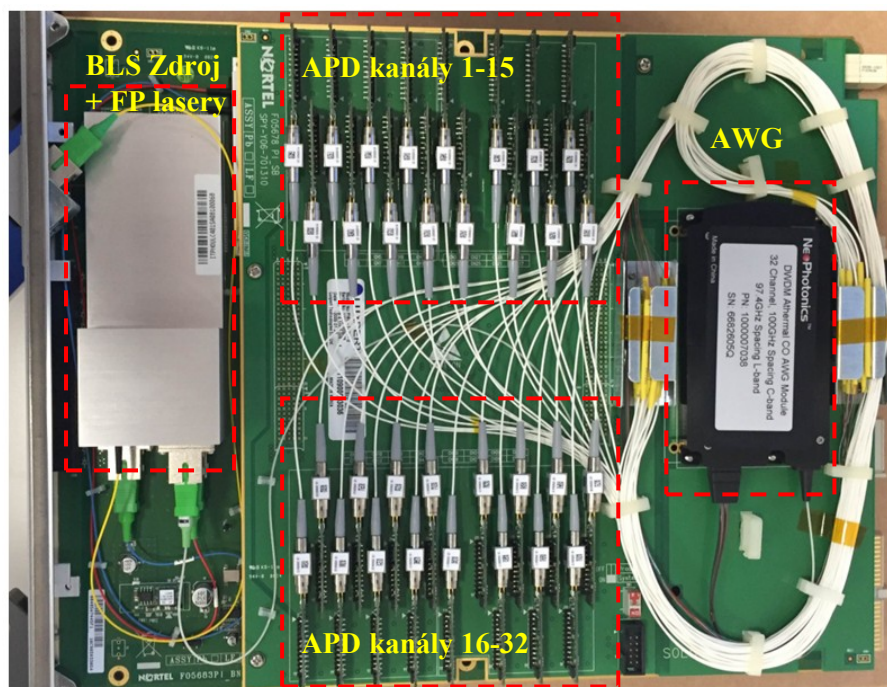
- IP adresa serveru: 192.168.142.105
- Uživatelské jméno: admin
- Heslo: admin

Po přihlášení konfigurační software umožňuje správu v grafickém režimu, kde nejprve byla provedena synchronizace databází mezi softwarovou aplikací v PC a databází v OLT jednotce. Synchronizace se provádí v nastavení *System/DB Synchronization*, kde je nutné zvolit *DB Sync Target* a následně potvrdit *Apply*. Poté v nastavení *Node/Equipment View* lze vidět přední panel OLT jednotky korespondující s reálným provedením včetně světelné signalizace činnosti jednotlivých prvků. Zvolením pomocí pravého kliknutí na PI kartu byla otevřena nastavení *Facility/ONT*, kde lze konfigurovat formou zapnutí a vypnutí kanály na všech dostupných kanálech. V případě hybridní fotonické sítě testované v diplomové práci byly aktivovány následující čísla příspěvkových kanálů uvedených v tabulce 5.3. Počet 6 koncových jednotek byl zvolen dle kapacitních možností a jednotlivé kanály byly zvoleny, tak aby bylo využito celého rozsahu 32 kanálů.

Tabulka 5.3: Příspěvkové kanály WDM-PON sítě

Aktivované příspěvkové kanály WDM-PON sítě					
1.	2.	12.	24.	31.	32.

Na následujícím obrázku je zobrazena PI karta WDM-PON systému, jenž tvoří jádro sítě s hustým vlnovým multiplexem. V pravé části lze pozorovat AWG směrovou odbočnici připojenou k 32 fotodetektorům typu APD a FP laserů umístěných ve dvoupatrovém rozložení ve střední části PI karty. V levé části je umístěn širokospektrální světelný zdroj sloužící pro naladění FP laserů jak na straně OLT jednotky, tak na straně koncového účastníka. AWG směrová odbočnice, konkrétně v tomto případě pod označením DWDM Athermal CO AWG modul je v OLT jednotce naprosto totožná s AWG směrovou odbočnicí standardně umístěnou v RN optické distribuční síti.



Obrázek 5.2: Karta PI WDM-PON systému

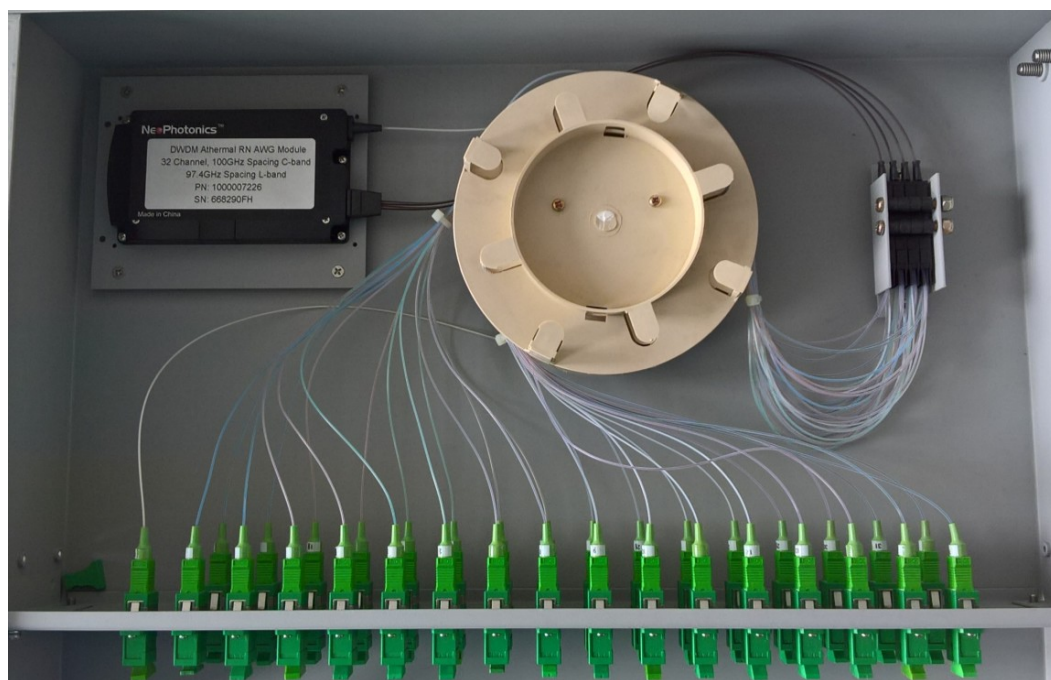
5.1.2.2 EARU 1112

Jedná se o koncovou jednotku EARU 1112 zajišťující konektivitu koncovým uživatelům na bázi bezbarvého ladění, čímž je dosaženo vysoké flexibility ve formě koncových jednotek nezávislých

na konkrétní vlnové délce. Obsahuje metalický port typu RJ 45 o standardu 100Base-TX díky čemuž poskytuje mnoho typů služeb. [13]

5.1.2.3 AWG - WPF 1132c

Ačkoliv se jedná o pasivní prvek, AWG směrová odbočnice spadá do technologie WDM-PON. AWG pod označením WPF 1132c slouží pro de/multiplexaci vlnových délek samotných přispěvkových kanálů. Jedná se o totožný prvek, jenž je umístěn v OLT jednotce. Na obrázku 5.3 je uvedena fotografie reálného AWG prvku dostupného v laboratoři PorEB 316, jenž byl použit v hybridní fotonické síti. Konkrétně tento prvek je konstruován s 100 GHz roztečí v C pásmu a 97,4 GHz roztečí pro L pásmo, tyto parametry korespondují s parametry AWG směrové odbočnice umístěné v PI kartě OLT jednotky.



Obrázek 5.3: AWG - WPF 1132c

5.2 Pasivní prvky a optické trasy

5.2.1 Realizace propojení laboratoří

V rámci budování optických tras bylo provedeno propojení tří laboratoří EB211, EB215 a EB315 do laboratoře optických sítí EB316, kde jsou mimo jiné umístěny pasivní přístupové systémy PON sítí. Propojení laboratoří bylo realizováno pomocí optického a ethernetového kabelu. Na vybudování těchto propojení se podílel tým studentů a zaměstnanců VŠB-TUO ve složení: Ing. J. Látal, Ing. L. Hájek, Ing. A. Vanderka, Ing. T. Hlavinka, Bc. M. Tkáčik, Bc. J. Vožický a Bc. Z. Wilček. Schematické znázornění vybudovaných tras je uvedeno v příloze v příloze na CD.

5.2.2 Měření útlumových bilancí pasivních prvků

Nedílnou částí diplomové práce bylo proměření pasivních prvků využitých v hybridní fotonické síti v podobě pasivních děličů o různém procentuálním rozdělení na jednotlivé výstupní porty. V práci byly využity celkově 2 druhy děličů. První s poměrem rozdělení 50/50 a druhý, sloužící

pro měřicí účely, s poměrem rozdělení optického výkonu 90/10. Výstupní port s 10% optickým výkonem byl využit pro připojení optických spektrálních analyzátorů, aby bylo možné zaznamenat spektrum vlnových délek. V následující tabulce 5.4 jsou uvedeny hodnoty vložného útlumu všech použitých pasivních děličů, včetně označení portů reprezentující umístění v rozvaděči umístěném v laboratoři EB316.

Tabulka 5.4: Vložný útlum optických pasivních rozbočovačů včetně označení portů v OPP4

Typ rozbočovače Porty v rozvaděči	1:2 (90/10)		1:2 (90/10)		1:2 (50/50)		1:2 (50/50)	
	9→10	9→11	13→14	13→15	17→18	17→19	21→22	21→23
1 310 nm	0,88	10,50	0,82	10,73	3,35	3,58	3,10	3,35
1 550 nm	0,99	10,51	0,89	10,62	3,38	3,36	3,21	3,23

Optická trasa využitá pro testování integrity hybridní fotonické sítě byla sestavena ze 4 dílčích částí, které byly vyvedeny na porty optického patch panelu pod označením OPP3 umístěném v rozvodné skříně R-A v laboratoři EB316. Vytvoření této optické trasy bylo umožněno díky výše zmíněnému budování propojení laboratoří, poněvadž využitá optická trasa je sestavena pro laboratoř EB315 jenž do dvou 24 portových optických patch panelů je vyvedeno po 10 úsecích 5 a 10 km dlouhých optických vláken standardu G.652.A.

Na výstupní porty v rozsahu 1 až 8 patch panelu OPP3 byly vyvedeny následující kombinace optických tras. Mezi porty číslo 1 a 2 byla vyvedena 5 km dlouhá trasa a mezi porty 3 a 4 10 km optické trasy. Další trasy již byly vytvořeny kombinací 5 a 10 km dlouhých úseků pro celkovou délku 15 km vyvedenou na porty 5 a 6. A poslední úsek trasy využitý pro hybridní fotonickou síť byl vytvořen propojením dvou 10 km tras vyvedených na porty 7 a 8 v OPP3.

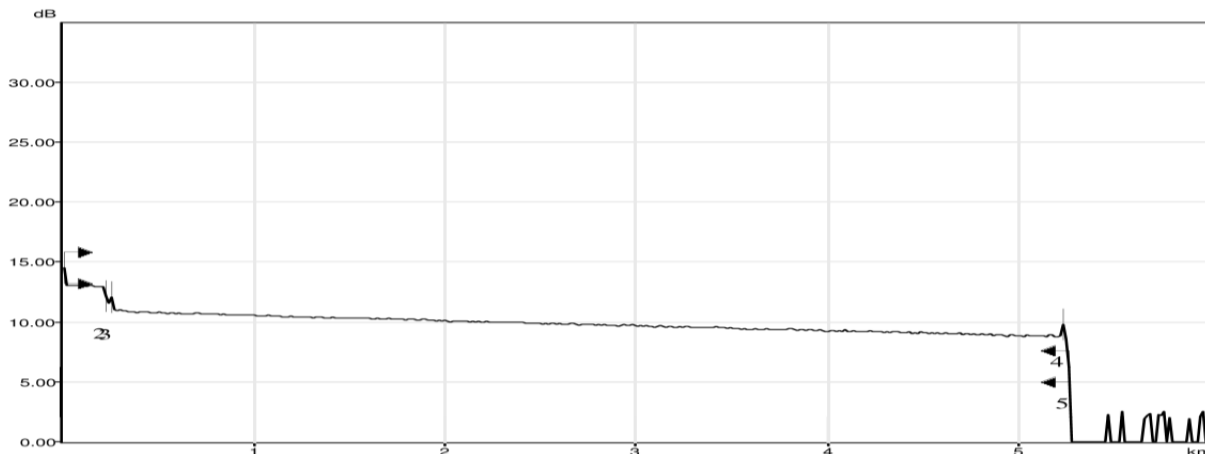
V tabulce 5.5 jsou uvedeny hodnoty útlumů 4 úseků optických tras s přibližnými délkami 5, 10, 15 a 20 km. Vzhledem k tomu, že se jedná o více než 20 let staré optické vlákno, jež je propojeno s patch panelem v laboratoři EB315 řadou svárů, spojek a konektorů byly změřeny výrazné hodnoty útlumu tohoto optického vlákna, konkrétně průměrná hodnota měrného útlumu vypočtená ze všech jednotlivě měřených optických tras činí pro vlnovou délku 1 550 nm téměř 0,5 dB/km a pro 1 310 nm tuto hodnotu dokonce přesahuje.

Tabulka 5.5: Úseky optické trasy včetně označení portů v OPP3

Porty OPP 3	1 310 nm		1 550 nm		L [km]
	I_L [dB]	α [dB/km]	I_L [dB]	α [dB/km]	
1→2	3,09	0,61	2,54	0,50	5,039
3→4	5,65	0,58	5,28	0,54	9,758
5→6	7,38	0,49	8,02	0,53	15,031
7→8	10,58	0,53	7,27	0,37	19,811
Celkem/Průměr	26,70	0,54	23,11	0,47	49,639

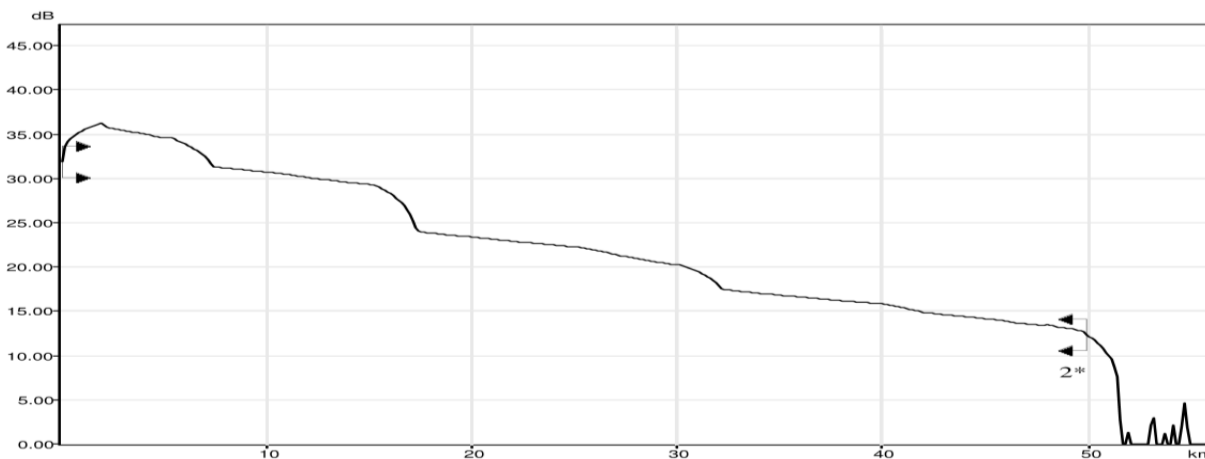
Kromě měření útlumových bilancí přímou metodou byla také využita nepřímá metoda pomocí OTDR modulu FTB 7200D od firmy EXFO. Na následujících dvou obrázcích 5.4 a 5.5 reprezentující reflektogramy zaznamenané pomocí nepřímé metody měření optické trasy.

Reflektogram uvedeném na obrázku 5.4 zobrazuje průběh 5 km dlouhé trasy měřené s nejmenším možným pulsem o velikosti 5 ns, jenž FTB 7200D modul umožňuje. V první části lze vidět cca 200 m dlouhé předřadné vlákno, které následováno přibližně 30 m dlouhým propojením laboratoří EB316 a EB315, na které je připojeno samotná optická trasa o délce cca 5 km.



Obrázek 5.4: Reflektogram 5 km dlouhé optické trasy

Zatímco na obrázku číslo 5.4 lze jednoznačně rozeznat jednotlivé události na optické trase, tak u reflektogramu uvedeném na obrázku 5.5 již to nelze tvrdit. Reflektogram reprezentuje 50 km dlouhou optickou trasu s měrným útlumem pro vlnové délky 1310 i 1550 nm pohybující se blízko hodnoty 0,5 dB/km, což při celkové délce 50 km činí téměř 25 dB. Z tohoto důvodu bylo nutné provést měření na nejdelším možném pulsu o velikosti 20 μ s, jenž má dostatečnou energii na překonání velké úrovně útlumu, ale na úkor možnosti rozeznatelnosti jednotlivých událostí na optické trase.



Obrázek 5.5: Reflektogram 50 km dlouhé optické trasy

5.2.3 Měření PMD a CD

Dalším provedeným testováním bylo proměření optické trasy z pohledu disperzí. Měření bylo provedeno pomocí měřicí platformy FTB-1 s moduly FTB-5500B pro měření PMD a modulem FTB-5800 pro měření chromatické disperze. Změřené hodnoty jednotlivých disperzí jsou uvedeny v tabulkách číslo 5.6 a 5.7.

Tabulka 5.6: Měření úseků optické trasy z pohledu vyhodnocení PMD

Označení optické trasy	Odhadovaná hodnota PMD [ps]	Koeficient PMD [ps/km ^{1/2}]	Délka [km]
1	1,422	0,633	5,039
3	0,325	0,104	9,758
5	2,712	0,699	15,031
7	4,231	0,951	19,811
1+3+5+7	5,233	0,743	49,639

Tabulka 5.7: Měření úseků optické trasy z pohledu vyhodnocení CD

Označení optické trasy	CD [ps/(nm×km)]	Slope [ps/(nm ² ×km)]	Délka [km]
1	16,699	0,058764	5,039
3	16,509	0,059341	9,758
5	16,388	0,058199	15,031
7	16,559	0,058425	19,811

5.2.4 Pásmové děliče a optické cirkulátory

Aby bylo možné sestavit hybridní fotonickou síť obsahující 4 polovodičového optické zesilovače bylo nutné separovat jednotlivé komunikační pásma na oddělené vlákna, detailní popis důvodu separování je uveden v následujících kapitolách zabývajících se popisem testování SOA zesilovačů. Pro tyto účely byly využito kaskádní zapojení pásmových filtrů v kombinaci s optickými cirkulátory, mezi které byly SOA umístěny. Tabulka číslo 5.8 uvádí katalogové parametry pásmových děličů.

Tabulka 5.8: Parametry pásmových děličů

Parametr	Číslo portu:	WDM.A1	WDM.A2	WDM.B1	WDM.B2
Rozsah vlnových délek [nm]	Port 1	1260 - 1360	1260 - 1360	1460 - 1510	1460 - 1510
	Port 2	1460 - 1620	1460 - 1620	1525 - 1640	1525 - 1640
Vložený útlum [dB]	Port 1	0,69	0,58	0,49	0,48
	Port 2	0,53	0,44	0,41	0,35
Izolace [dB]	Port 1	37	39	39	36
	Port 2	23	22	26	28
Směrovost [dB]		56	55	55	56
Útlum odrazu [dB]		57	56	53	51

V tabulce číslo 5.9 jsou uvedeny katalogové parametry optických cirkulátorů využitých v hybridní fotonické síti pro oddělení vzestupného a sestupné směru přenosu data technologie DWDM-PON.

Tabulka 5.9: *Parametry optických cirkulátorů*

Parametr	Číslo portu:	Thorlabs - 3 port Circulator 6015-3-APC	Polarization Insensitive Circulator C+L band
Rozsah vlnových délek [nm]		1 525 - 1610	1 525 - 1 625
Vložný útlum [dB]	Port 1→2	0,59	0,58
	Port 2→3	0,63	0,54
Izolace [dB]	Port 2→1	56	52
	Port 3→2	55	51
Směrovost [dB]	Port 1→3	60	-
	Port 3→1	60	-
Útlum odrazu [dB]	Port 1	60	>50

5.3 Měřicí přístroje a zařízení

V rámci měření a testování hybridní fotonické sítě bylo použita celá řada měřících přístrojů, zejména od firmy EXFO. V následujících kapitolách je uveden přehled všech využitých měřících přístrojů a popisem základních parametrů a jejich využití v hybridní síti.

5.3.1 EXFO FTB-500

V případě FTB-500 se nejedná o měřící přístroj, nýbrž o modulární platformu obsahující 8 slotů, do kterých je možné umístit samotné měřící moduly. V FTB-500 je použit operační systém XP s procesorem Intel a je možné připojit do sítě Internet, čímž je umožněna vzdálená správa včetně dynamického přenosu dat do databáze. Mimo externích specializovaných měřících modulů samotná platforma obsahuje síťové nástroje Wireshark, JPerf a Network Stumbler.



Obrázek 5.6: FTB-500

5.3.1.1 FTB-5240BP

Jedná se o vysoce přesný, uživatelsky přívětivý inteligentní optický spektrální analyzátor (OSA) sloužící pro analýzu CWDM a DWDM optických sítí. Mezi klíčové vlastnosti patří měření hodnoty OSNR $40 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$ systémů pomocí in-band metody v souladu doporučení ITU-T G.697. V tabulce 5.10 jsou uvedeny základní parametry měřícího modulu. V rámci měření hybridní sítě byly využity režimy analýzy WDM a EDFA, kromě těchto dvou režimů modul umožňuje analyzovat optické spektrum v režimech DFB, FP, drift a spektrální postup.

Tabulka 5.10: Vybrané parametry modulu FTB-5240BP

Parametr	Hodnoty
Rozsah vlnových délek	1 250–1 650 nm
Šířka šterbiny (FWHM)	0,033 nm
Dynamický rozsah	–80 – +18 dBm
Kanálové rozteče	12,5–200 GHz CWDM

5.3.1.2 FTB-7200D

OTDR (Optical time-domain reflectometry) modul optimalizovaný pro testování jedno a více-vidových optických vláken nasazených v přístupových sítích s dynamickým rozsahem až 36 dB s mrtvou zónou nižší než 1 metr. Modul je kompatibilní s platformami FTB-2, 200 a 500 o velikosti jednotky schopný testování optické sítě s šířkou pulsu od 5 do 1000 ns u vícevidových vláken a 5 ns až 20 μ s u jednovidových vláken do maximální vzdálenosti 260 km.

5.3.1.3 FTB-5500B

PMD (Polarization Mode Dispersion) modul umožňující měřit polarizačně-vidovou disperze za méně než 5 vteřin v jakémkoliv PMD rozsahu, což umožňuje testování více vláken v kratším čase, neobsahuje autokorelační špičky, čímž je dosažena mimořádně vysoká přesnost měření a zároveň umožňuje testování skrz vláknových zesilovačů EDFA. Modul FTB-5500B je vhodný pro všechny typy sítí a schopný měřit 100 Gbit \times s⁻¹ systémy včetně dlouhých a ultra dlouhých vzdáleností, jak už závěsných tak i pozemních.

Tabulka 5.11: Vybrané parametry modulu FTB-5500B

Parametr	Hodnoty
Rozsah vlnových délek	1 260–1 675 nm
Měřicí rozsah	0 – 115 ps
Citlivost	–47 dBm

5.3.1.4 FTB-5800

Modul CD (Chromatic Dispersion) využívající vysoce přesnou metodu fázového posuvu s patentovaným designem testování skrz vláknové zesilovače EDFA připravené testovat 100 Gbit \times s⁻¹ systémy. Stejně jako modul FTB-5500B, tak i modul FTB-5800 je navržen pro všechny typy sítí jako jsou WDM sítě, či dlouhé, resp. ultra dlouhé sítě s uživatelskou správou dat generovaných do jasných a nastavitelných reportů.

Tabulka 5.12: Vybrané parametry modulu FTB-5800

Parametr	Hodnoty
Rozsah vlnových délek	1 530–1 625 nm (1 200–1 700nm)
Min. krok vlnové délky	0,1 nm
Max. počet měřících bodů	950 (definovatelné)
Dynamický rozsah	42 dB
Nejistota přesnosti vlnové délky	0,1 nm

5.3.2 EXFO FTB-1

FTB-1 je modulární platforma pro rychlé a výkonné víceúčelové testování FTTX (FTTH a FTTD), Ethernet a TDM. Jedná se o ruční platformu pracující pod operačním systémem Windows XP s procesorem Intel obsahující síťové testovací nástroje Wireshark, JPerf a Network Stumbler.



Obrázek 5.7: FTB-1

5.3.2.1 NetBlazer 860

Jedná se o modul řady NetBlazer s širokým spektrem víceúčelových aplikací kompatibilní s platformou FTB-1. Je vybaven dvěma porty standardu 10/100/1000 Base-TX a dvěma sloty 100/1000 Base-Fx pro SFP moduly. Moduly z řady NetBlazer nabízí technicky komplexní a přesto jednoduchý testovací aparát pro rychlé a jednoduché ověření a řešení problémů v Ethernet sítích, Fiber Channel a SyncE/1588 PTP služeb se schopností testování pomocí standardu EtherSAM s přenosovými rychlostmi od $10 \text{ Mbit} \times \text{s}^{-1}$ až do $10 \text{ Gbit} \times \text{s}^{-1}$.

Mezi hlavní charakteristiky a výhody patří urychlení aktivace Ethernetových služeb pomocí obousměrného testování standardy EtherSAM (ITU-T Y.1564) a RFC 2544, testování pomocí generátoru datového toku, v Through režimu a nebo pomocí BER testu. Kromě výše zmíněných testů obsahuje integrované aplikace pro testování VoIP služeb a další nástroje jako jsou EXpert VoIP a EXpert IP.

5.3.3 AXS-200/850

Inovativní komplexní testovací sada s unikátním grafickým zobrazením dat s možností výkonnostního testování techniků v terénu. Obsahuje simultánní obousměrné testování dle standardu RFC 2544, generátor datového toku a monitoring pro výkonnostní testování sítě, testování bitové chybovosti pomocí testu BERT až do 4 vrstvy standardu ISO-OSI. Kromě testování je možné AXS-200/850 využít jako loopback jednotku s automatickým režimem inteligentního skenování sítě za účelem nalezení dalších testovacích zařízení, se kterými je schopné se spárovat, schopnost testovat QoS, Tos a diffserv a to vše v kompaktní, robustní a jednoduše přenosné jednotce.



Obrázek 5.8: AXS-200/850

5.3.4 OSA 20

Jedná se o spektrální vysoko výkoný analyzátor od firmy Yenista schopný pracovat v rozsahu vlnových délek 1250 až 1700 nm. Navržen pro rychlé a přesné skenování s vysokým dynamickým rozsahem eliminující kompromisy u konvenčních měřicích přístrojů. OSA 20 podporuje sedm různých analytických nástrojů:

- OSA: Optický spektrální analyzátor
- WDM: Vlnově dělený multiplex
- OFA: Optické vláknové zesilovače
- SML: Jednovidový laser
- MML: Vícevidový laser
- BBS: Širokopásmový zdroj
- PCT: Testování pasivních komponent



Obrázek 5.9: OSA 20

Tabulka 5.13: Vybrané parametry spektrálního analyzátoru OSA 20[22] [23]

Parametr	Hodnoty
Rozsah vlnových délek	1 250–1 700 nm
Šířka šterbiny (FWHM)	0,020 nm
Dynamický rozsah	–60 – +20 dBm

6 Testování polovodičových zesilovačů

V rámci praktické části diplomové práce zabývající se nasazením polovodičových SOA zesilovačů do integrované pasivní optické sítě tvořené DWDM-PON a EPON2 sítěmi bylo provedeno experimentální měření a testování dostupných polovodičových zesilovačů. Vzhledem k tomu, že integrovaná optická síť je vytvořena sloučením sítí DWDM-PON a EPON2 pracujících v optických pásmech O a S pro EPON2 a C a L pro DWDM-PON, je žádoucí nasadit do sítě pro každé optické pásmo speciální zesilovač. V následující tabulce 6.1 jsou uvedeny typy zesilovačů, které byly podrobeny testování a v tabulce 6.2 jsou uvedeny podrobnější informace o testovaných zesilovačích.

Tabulka 6.1: Testované optické zesilovače a základní parametry

Typ zesilovače	Operační proud	Oblast zesílení
SOA 1017S	600 mA	O-pásmo
SASH 24P151	390 mA	S-pásmo
SOA 1117P	500 mA	C-pásmo
BOA 1080 P	600 mA	L-pásmo

Tabulka 6.2: Vybrané parametry SOA zesilovačů

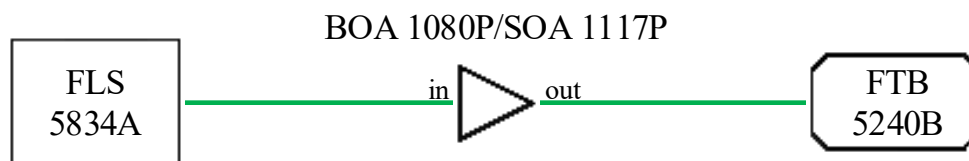
Typ zesilovače	Oblast max. ASE	Max. zisk	Šumové číslo	$P_{SAT} @ 3dB$
SOA 1017S	1 319,1 nm	30,3 dB	6,5 dB	+ 16,9 dBm
SASH 24P151	1 470,0 nm	29,4 dB	7 dB	+ 11,6 dBm
SOA 1117P	1 557,9 nm	21,2 dB	10,6 dB	+ 9,2 dBm
BOA 1080 P	1 577,2 nm	29,9 dB	7,7 dB	+ 16,1 dBm

6.1 SOA zesilovače v C a L pásmu

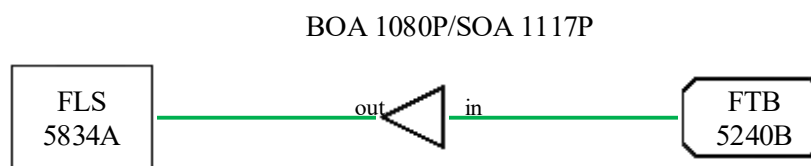
V rámci testování optických polovodičových zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P, dle katalogových údajů pracujících v pásmech L a C, byl proveden jako první test v zapojení s širokopásmovým zdrojem FLS-5834A vysílající v pásmech C a L, kdy zesilovače byly jednotlivě zapojeny, přičemž byl proveden test jak v přímém, tak i v nepřímém směru přenosu. I přesto, že se jedná o zesilovače typu TW-SOA je v katalogu uveden vstupní a výstupní port, podle čehož byl určen přímý a nepřímý směr zapojení zesilovače. Vyhodnocení a záznam spektrálních charakteristik byl proveden pomocí měřicí jednotky od firmy EXFO FTB-500 s modulem FTB 5240B.

6.1.1 Experimentální pracoviště s širokopásmovým zdrojem

Obrázky 6.1 a 6.2 reprezentují sestavení měřicího pracoviště. Jako referenční měření byla změřena spektrální charakteristika širokopásmového zdroje FLS-5834A přímým připojením na optický spektrální analyzátor FTB 5240B.



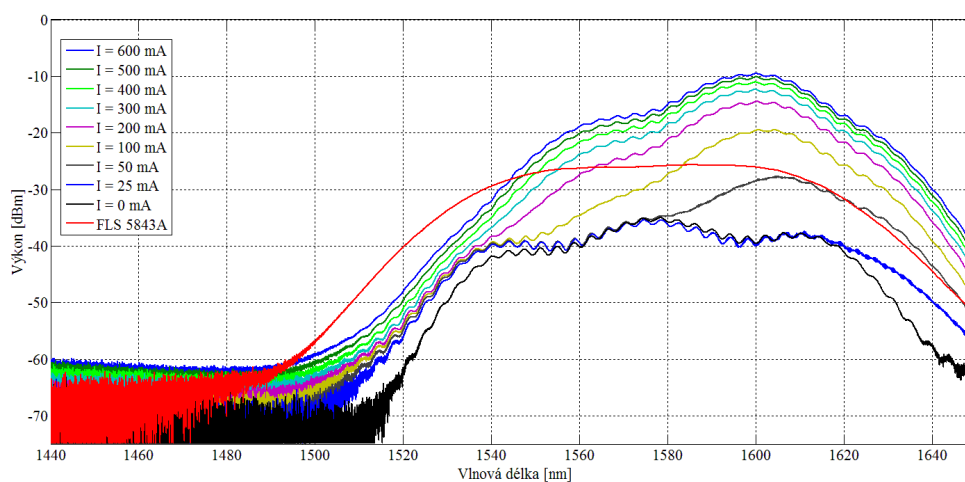
Obrázek 6.1: Zapojení zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P v přímém směru



Obrázek 6.2: Zapojení zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P v nepřímém směru

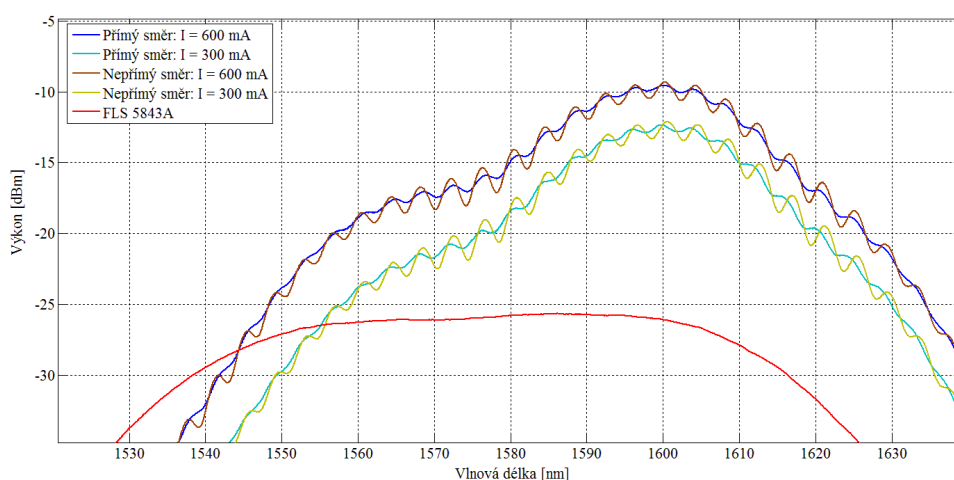
6.1.2 Polovodičový zesilovač BOA 1080P

Obrázek 6.3 reprezentuje spektrální charakteristiku širokopásmové zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem BOA 1080P, který je zapojen v přímém směru. Celková spektrální charakteristika v nepřímém směru zde uvedena není, neboť vykazuje minimální rozdíly oproti přímému zapojení.



Obrázek 6.3: Spektrum zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem BOA 1080P v přímém směru

Jednotlivé křivky grafu reprezentují hodnoty vstupního proudu zesilovače v rozmezí od nulové hodnoty po hodnotu operačního proudu uvedenou v katalogu zesilovače, viz tabulka 6.1, přičemž tato hodnota byla v rámci testování zvolena jako maximální. Červená křivka grafu reprezentuje referenční měření zdroje FLS-5834A bez použití zesilovače.



Obrázek 6.4: Přiblížení optického spektra zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem BOA 1080P v přímém a nepřímém směru pro vstupní proudy 600 mA a 300 mA

Obrázek 6.4 reprezentuje přiblížení spektrální charakteristiky zesilovače BOA 1080P jak v přímém, tak i v nepřímém směru v závislosti na vstupních proudech 300 mA a 600 mA. Podstatný rozdíl mezi přímým a nepřímým zapojením zesilovače je ve tvaru spektrální křivky zesíleného signálu, která je v nepřímém směru tvořena kmitáním.

V tabulce 6.3 jsou uvedeny hodnoty zisku zesilovače BOA 1080P pro zdroj FLS-5834A. Hodnoty reprezentují, jak zisk v přímém a nepřímém směru zapojení zesilovače, tak i rozdíl těchto zisků. Maximální rozdíl zisků byl zaznamenán na vlnové délce 1591,28 nm a to 1,38 dB ve prospěch přímého směru zapojení. Čísla kanálů a jejich odpovídající vlnové délky byly zvoleny podle použitého DWDM rastru systému DWDM-PON s ohledem na reálné zapojení, kde byly použity 4 koncové jednotky na kanálech 1,12, 22 a 32.

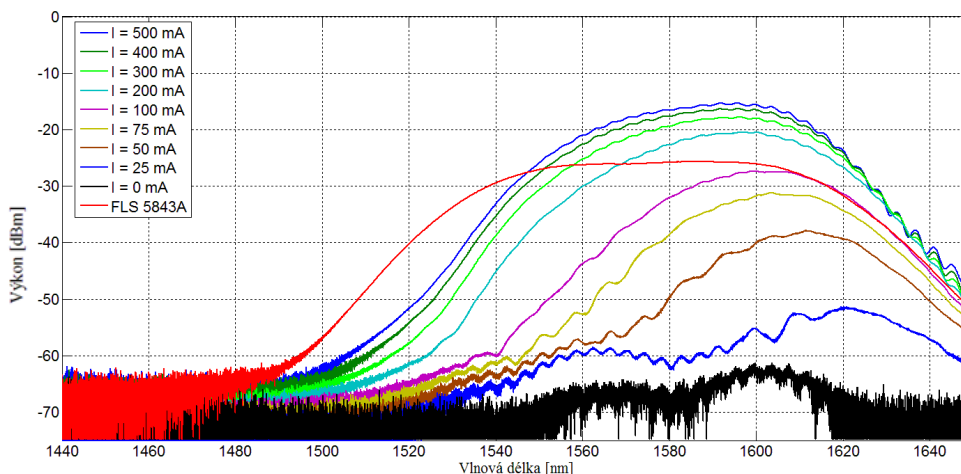
Tabulka 6.3: Zisk zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Zisk: [dB]	Přímý směr	-4,61	-0,97	3,27	6,59	8,97	11,68	16,15	16,41
	Nepřímý směr	-4,37	-1,33	2,68	5,92	7,94	11,32	14,77	16,42
	Rozdíl	-0,24	0,36	0,59	0,67	1,03	0,36	1,38	-0,01

Na vlnových délkách 1533,47 nm a 1542,14 nm kanálů 1-US a 12-US dochází k utlumení optického signálu, což činí z tohoto zesilovače, dle změřených dat nevhodný typ pro DWDM-PON sítě. Při vyšších vlnových délkách již dochází k zesílení, přičemž maximálního zisku zesilovače je dosaženo u posledního kanálu na vlnové délce 1599,54 nm a to 16,4 dB.

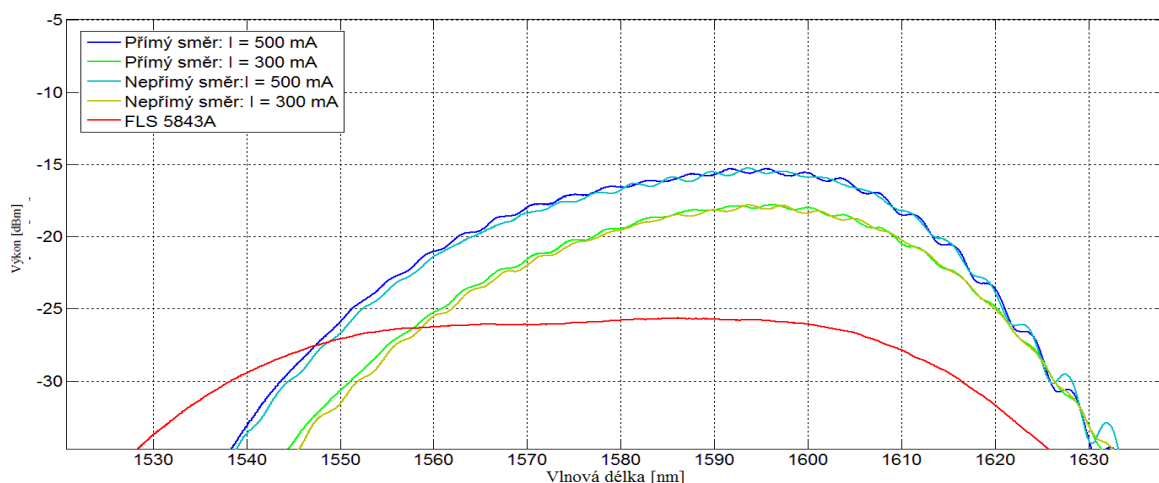
6.1.3 Polovodičový zesilovač SOA 1117P

Druhý testovaný zesilovač byl SOA 1117P s katalogovým údajem jako zesilovač pro C pásmo. Na obrázku 6.5 je uvedena spektrální charakteristika po průchodu zesilovačem optického výkonu ze zdroje FLS-5834A v závislosti na velikosti vstupního proudu až do maximální hodnoty 500 mA, která je rovná hodnotě operačního proudu specifikovaného v katalogu zesilovače. Opět je zde uvedena pouze spektrální char. přímého směru, neboť rozdíl mezi nepřímým směrem je minimální.



Obrázek 6.5: Spektrum zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem SOA 1117P v přímém směru

Obrázek 6.6 uvádí spektrální charakteristiky pro vstupní proudy 500 mA a 300 mA v přímém a nepřímém směru zapojení. Na rozdíl od spektra zesilovače BOA 1080P uvedeném na obrázku 6.4 nebylo v nepřímém směru zaznamenáno kmitání v tak velkém rozsahu.



Obrázek 6.6: Přibližné optické spektrum zdroje FLS-5834A po zesílení zesilovačem SOA 1117P v závislosti na směru zapojení pro vstupní proudy 500 mA a 300 mA

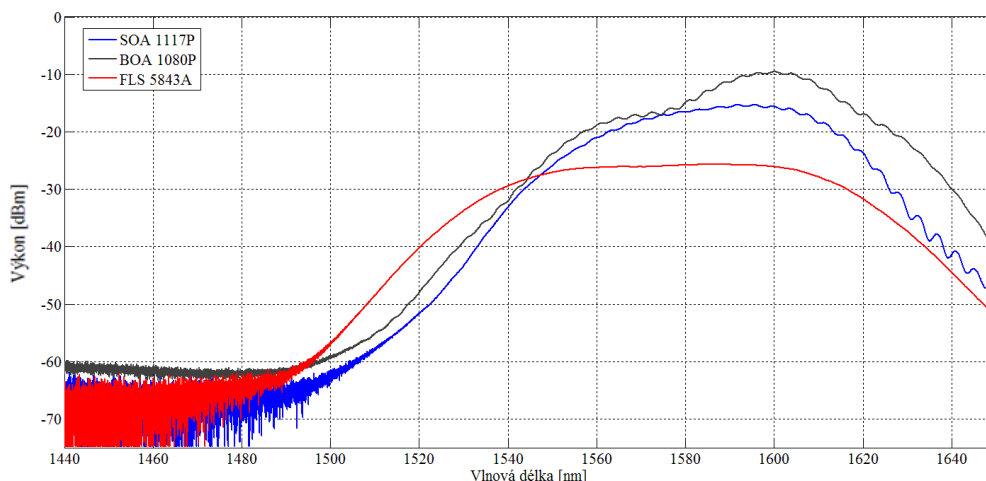
Tabulka číslo 6.4 uvádí hodnoty zisků v závislosti na směru zapojení zesilovače pro 8 DWDM kanálů použitého systému. Ve stejném trendu jako u zesilovače BOA 1080P i zde bylo zaznamenáno při kanálech 1a a 12a zeslabení optického signálu, což činí ze zesilovače nevhodného kandidáta pro nasazení na DWDM-PON systém. Při vyšších vlnových délkách již dochází ke zvyšujícímu se zesílení.

Tabulka 6.4: Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Zisk [dB]	Přímý směr	-7,53	-2,38	1,25	4,52	8,82	9,52	10,38	10,46
	Nepřímý směr	-8,52	-3,24	0,44	3,94	8,42	9,32	9,99	10,17
	Rozdíl	0,99	0,86	0,81	0,58	0,4	0,2	0,39	0,29

6.1.4 Komparace zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P

Spektrální charakteristiky zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P zesíleného signálu při maximální hodnotě operačního proudu jsou uvedeny na obrázku 6.7. Z charakteristiky je jasné patrné, že v celém spektru pracovních vlnových délek obou zesilovačů zesílení zesilovače SOA 1117P dosahuje menších hodnot než u BOA 1080P.



Obrázek 6.7: Spektrální charakteristiky zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P při maximálním operačním proudu

V tabulce 6.5 jsou uvedeny hodnoty zisků obou testovaných zesilovačů pro několik vybraných DWDM kanálů, přičemž je zde uveden nominální rozdíl zisku, který na všech měřených kanálech je větší ve prospěch zesilovače BOA 1080P. Při posledním kanálu 32b na vlnové délce činí rozdíl v zisku téměř 6 dB.

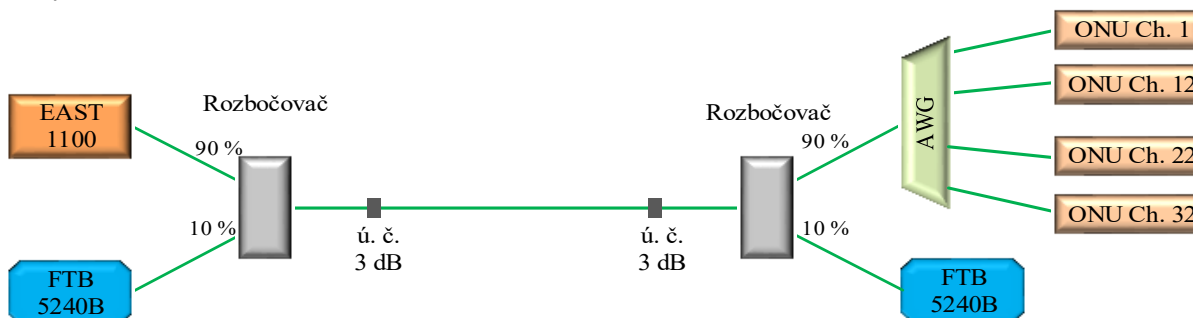
Tabulka 6.5: Zisk zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P v závislosti na DWDM kanálu v přímém směru

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Zisk [dB]	BOA 1080P	-4,61	-0,97	3,27	6,59	8,97	11,68	16,15	16,41
	SOA 1117P	-7,53	-2,38	1,25	4,52	8,82	9,52	10,38	10,46
	Rozdíl	2,92	1,41	2,02	2,07	0,15	2,16	5,77	5,95

6.2 Nasazení zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P do DWDM-PON sítě

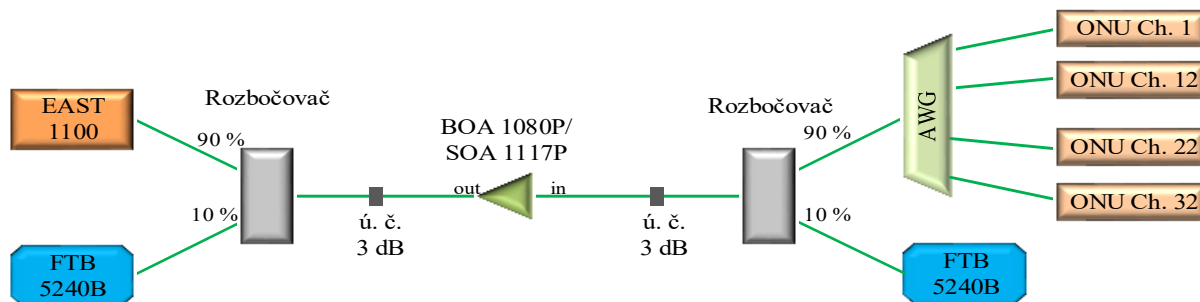
6.2.1 Topologie testované DWDM-PON sítě

Další test byl proveden nasazením zesilovačů do DWDM-PON sítě. Topologie sítě byla vytvořena z OLT jednotky EAST 1100, dvou optických rozbočovačů s poměrem rozdělní 90 % a 10 %, kde 10% výstupní port byl použit jako monitorovací a byl na něm připojen optický spektrální analyzátor FTB 5240B.



Obrázek 6.8: Topologie referenčního měření DWDM-PON sítě

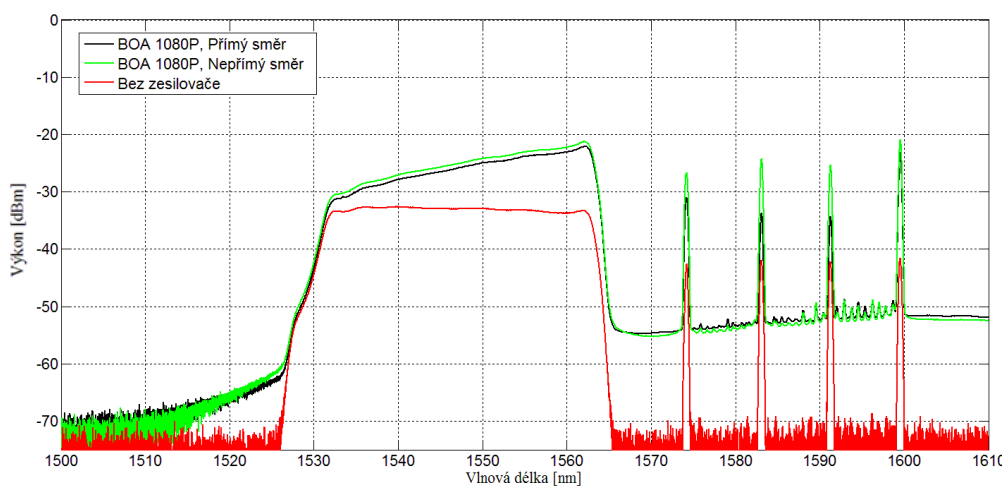
Díky použití 10% děliče jsou veškeré spektrální charakteristiky sníženy ve výkonové úrovni o 10 dBm oproti reálné hodnotě. Dále topologie obsahovala AWG směrovou odbočnici a 4 koncové jednotky EARU 1112. Aby nedošlo k poškození fotodetektorů v OLT a EARU jednotkách zesíleným signálem, tak byly do sítě vloženy dva útlumové články s hodnotou 3 dB a 3 dB. Referenční topologie bez nasazených zesilovačů je uvedena na obrázku 6.8. Testování bylo provedeno vždy s jedním zesilovačem, jak v přímém tak i v nepřímém zapojení v komunikačním řetězci.



Obrázek 6.9: Topologie DWDM-PON sítě s nasazeným zesilovačem v přímém směru pro sestupný provoz

6.2.1.1 Polovodičový zesilovač BOA 1080P v sestupném směru

Spektrální charakteristiky zesíleného signálu pomocí zesilovače BOA 1080P zapojeném v přímém a nepřímém směru provozu dat jsou uvedeny na obrázku 6.10. Na rozdíl od experimentálního měření pomocí širokopásmového zdroje FLS5834A, zde již v oblasti prvních kanálů přenosového systému nedochází k utlumení signálu. Při zvyšující se vlnové délce v C pásmu dochází ke zvětšování hodnoty zisku až do cca 11 dB pro vlnovou délku 1558,173 nm sloužící pro naladění koncové jednotky na 32. kanále. Rozdíl v zisku mezi přímým a nepřímým směrem v C pásmu ve všech měřených kanálech vykazuje minimální rozdíly, přičemž většího zisku je dosaženo v nepřímém směru provozu.



Obrázek 6.10: Spektrum zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém směru zapojení

V L pásmu, kde probíhá přenos dat v sestupném směru provozu komunikačního řetězce, jsou již rozdíly v zisku markantní, konkrétně u kanálu číslo 12 na vlnové délce 1583,087 nm činí zisk v přímém směru zapojení zesilovače 8,14 dB, zatímco v nepřímém směru je zisk roven hodnotě

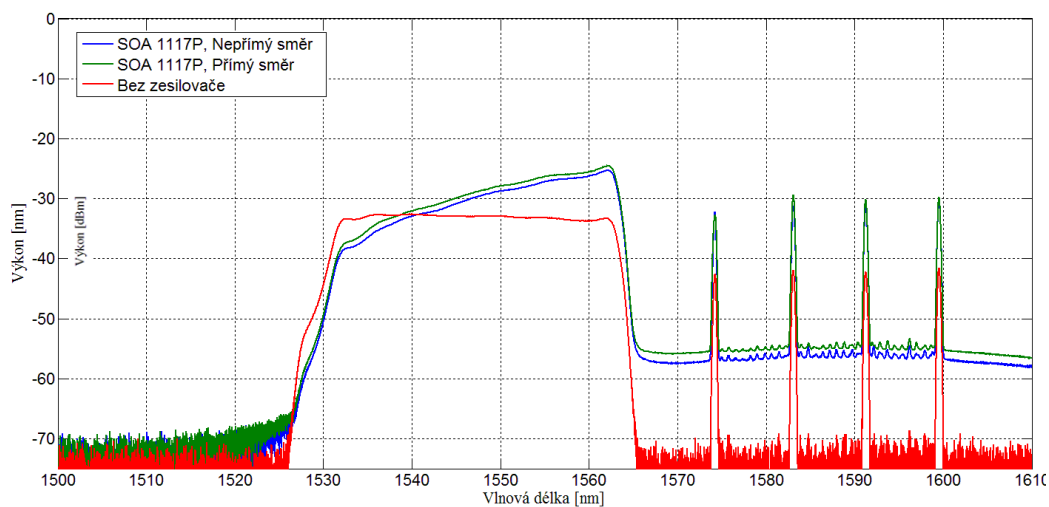
17,64 dB, což činí rozdíl zisku v 9,5 dB ve prospěch nepřímého směru. Obdobné hodnoty byly také změřeny u kanálu číslo 22. U prvního a posledního přenosového kanálu 1 a 32 dosahuje rozdíl zisku podstatně menších hodnot, viz tabulka 6.6.

Tabulka 6.6: Zisk zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Zisk [dB]	Přímý směr	2,63	5,56	7,99	10,21	11,8	8,14	7,99	18,36
	Nepřímý směr	3,26	6,34	8,71	11,03	16,14	17,64	16,98	20,6
	Rozdíl	-0,63	-0,78	-0,72	-0,82	-4,34	-9,5	-8,99	-2,24

6.2.1.2 Polovodičový zesilovač SOA 1117P v sestupném směru

Zesilovač SOA 1117P, který dle informací uvedených v katalogu by měl zesilovat optický výkon v C pásmu, tak do vlnové délky 1540 nm signál zeslabuje, konkrétně pro první kanál v C pásmu na vlnové délce o 3,39 dB pro přímý směr, resp. o 4,51 dB v nepřímém směru. Na rozdíl od zesilovače BOA 1080P, u kterého v L pásmu činí rozdíl zisků přímého a nepřímého směru zapojení markantních rozdílů, je u zesilovače SOA 1117P rozdíl zisků v celé oblasti C a L pásem vyrovnaný. Přičemž většího zisku je dosaženo v přímém směru zapojení. Spektrální charakteristika je uvedena na obrázku 6.11.



Obrázek 6.11: Spektrum zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém směru zapojení

Zisk v C pásmu dosahuje zvyšujícího se lineárního trendu, kde na prvních kanálech činí hodnota zisku -3,39 dB a na posledním kanálu již zesilovač dosahuje zisku téměř 8 dB. V L pásmu pro 4 zaznamenané kanály se pohybuje hodnota zisku v rozmezí od cca 10 dB do 12,5 dB v přímém směru, viz tabulka 6.7.

Tabulka 6.7: Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Zisk [dB]	Přímý směr	-3,39	1,53	5,02	7,71	9,92	12,54	12,03	11,79
	Nepřímý směr	-4,51	0,57	4,21	6,97	10,41	10,64	10,82	11,21
	Rozdíl	1,12	0,96	0,81	0,74	-0,49	1,9	1,21	0,58

6.2.1.3 Komparace BOA 1080P a SOA 1117P v sestupném směru DWDM-PON sítě

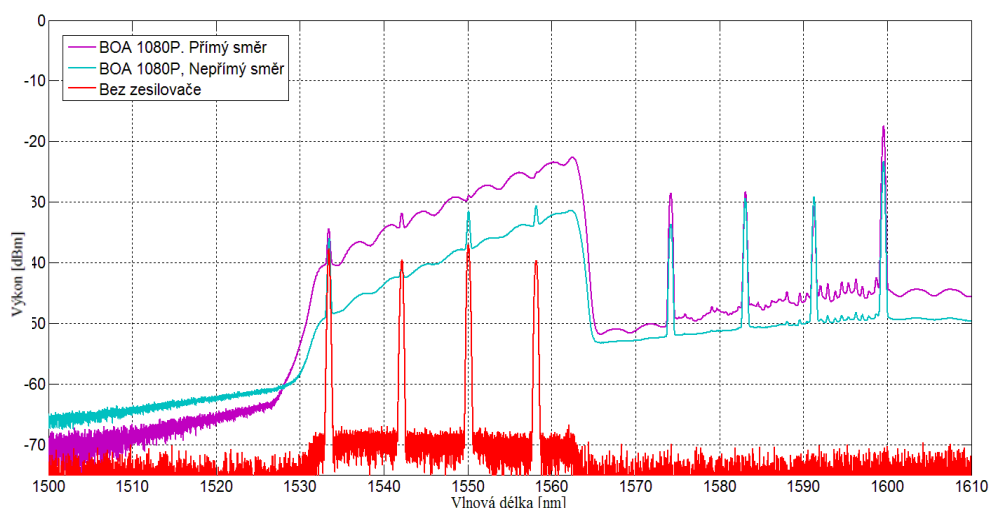
Tabulka 6.8 reprezentuje shrnutí zisků jednotlivých zesilovačů v závislosti na vlnových délkách DWDM kanálů, přičemž jsou zde uvedeny hodnoty zisku BOA 1080P zesilovače v nepřímém zapojení a SOA 1117P zesilovače v přímém zapojení. Ve všech bodech měření dosahuje zesilovač BOA 1080P vyšších hodnot zisku, v C pásmu průměrně o 4,6 dB a v L pásmu průměrně o 6,2 dB větších hodnot.

Tabulka 6.8: Komparace zisků zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Zisk [dB]	BOA 1080P	3,26	6,34	8,71	11,03	16,14	17,64	16,98	20,6
	SOA 1117P	-3,39	1,53	5,02	7,71	9,92	12,54	12,03	11,79
	Rozdíl	6,65	4,81	3,69	3,32	6,22	5,1	4,95	8,81

6.2.1.4 Polovodičový zesilovač BOA 1080P ve vztupném směru

Na obrázku 6.12 je uvedena spektrální charakteristika vztupného směru DWDM-PON systému obsahující 4 kanály. Červená křivka reprezentuje optické spektrum bez zesilovače, kde v C pásmu jsou 4 příspěvkové kanály reprezentující vysílání 4 koncových jednotek.



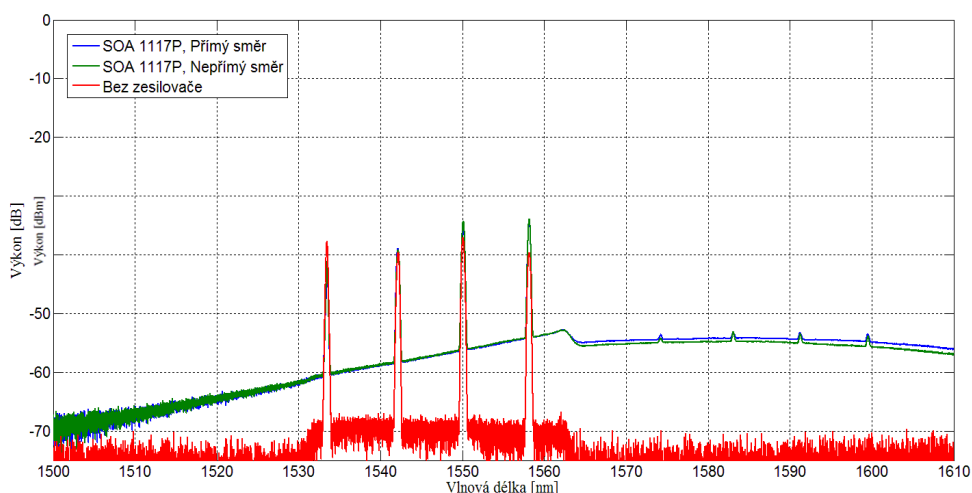
Obrázek 6.12: Spektrum zesilovače BOA 1080P v přímém a nepřímém směru zapojení ve vztupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému

Při nasazení polovodičového zesilovače TW-SOA do DWDM-PON sítě, která vysílá v sestupném směru v C pásmu širokopásmové záření sloužící pro ladění Fabry-Perotových laserů v

koncových jednotkách a ve vzestupném směru v C pásmu odesílá příspěvkové kanály z těchto koncových jednotek. Dochází ke kombinaci a vzájemného ovlivnění těchto dvou směrů, což vede ke vzniku přechodů fotonů z širokopásmového záření v sestupném směru do vzestupného směru, tak jak lze pozorovat na obrázku 6.12.

6.2.1.5 Polovodičový zesilovač SOA 1117P ve vzestupném směru

Při testování druhého polovodičového zesilovače SOA 1117P, již k tak razantní deformaci optického spektra ve vzestupném směru nedošlo, viz obrázek 6.13. U prvního kanálu došlo v přímém směru k zeslabení o cca 7 dB, další kanál byl zesílen o 0,5 dB a další již o 3dB, resp. 5,3 dB v přímém směru.



Obrázek 6.13: Spektrum zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém směru zapojení ve vzestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému

Konkrétní hodnoty zisku v přímém a nepřímém zapojení zesilovače pro jednotlivé DWDM kanály jsou uvedeny v tabulce 6.9 včetně rozdílu mezi jednotlivými směry zapojení zesilovače.

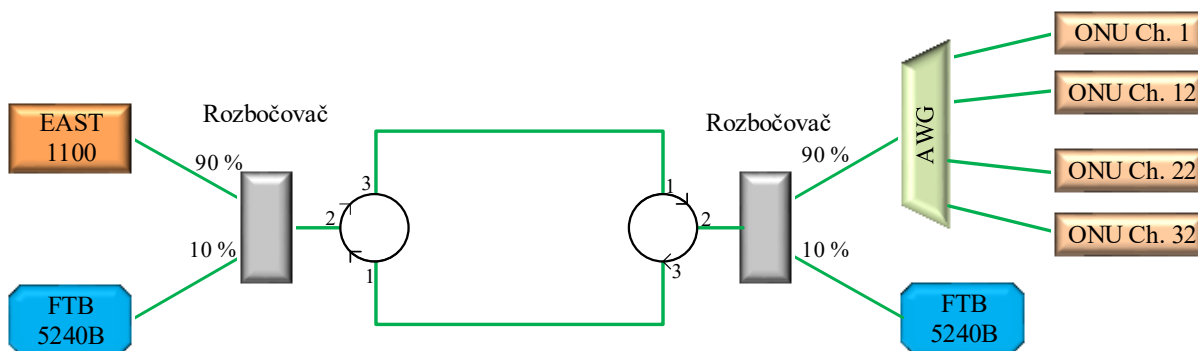
Tabulka 6.9: Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém a nepřímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému

Číslo kanálu		1-US	12-US	22-US	32-US
Vlnová délka [nm]		1533,47	1542,14	1550,12	1558,17
Zisk [dB]	Přímý směr	-7,12	0,62	2,99	5,3
	Nepřímý směr	-3,74	0,41	2,99	5,81
	Rozdíl	-3,38	0,21	0,00	-0,51

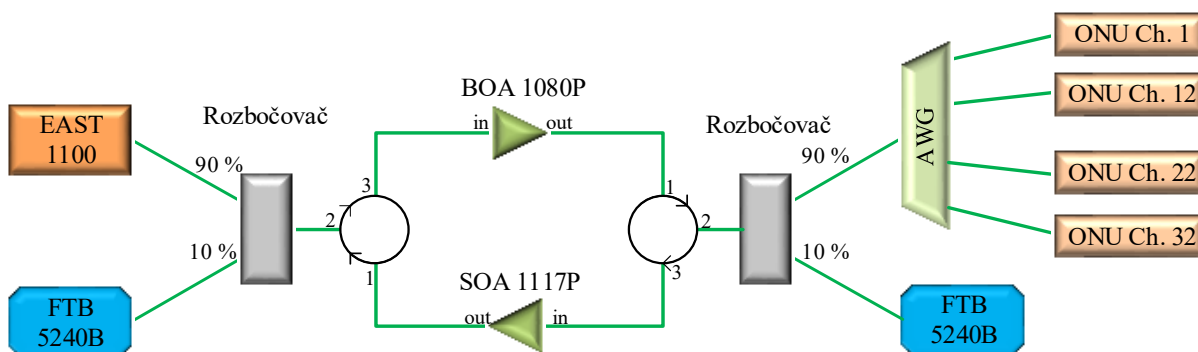
6.2.2 DWDM-PON síť se SOA zesilovači a cirkulátory

6.2.2.1 Topologie testované sítě obsahující cirkulátory

Do sestavené topologie vytvořené v předchozím měření byly umístěny dva optické cirkulátory pro C a L pásmo, které rozdělily sestupný a vzestupný přenos dat. Cirkulátory byly umístěny mezi dva optické rozbočovače obsahující 10% výstupní port, na který byl připojen optický spektrální analyzátor, viz obrázek 6.15. Jako referenční měření byla použita topologie bez zesilovačů, viz obrázek 6.14.



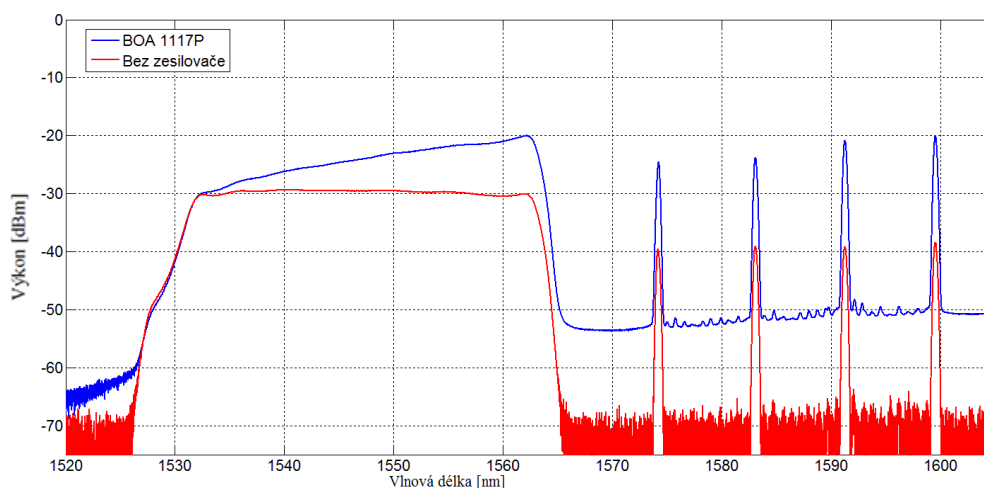
Obrázek 6.14: Topologie referenčního měření DWDM-PON sítě s cirkulátory



Obrázek 6.15: Topologie spektrálního měření DWDM-PON sítě se SOA zesilovači a cirkulátory

6.2.2.2 Sestupný provoz v DWDM-PON sítí

V sestupném směru přenosu dat byl použit zesilovač BOA 1080P zapojený v přímém směru. Obrázek 6.16 reprezentuje spektrální charakteristiku referenčního naměru a zesíleného signálu, přičemž zesílení v C pásmu má vzrůstající trend, kde při vlnové délce sloužícímu pro ladění prvního kanálu ve vzestupném směru činí 0,80 dB, zatímco u posledního již 8,80 dB. Obdobný trend zvyšujícího se zisku lze pozorovat i v L pásmu, kde probíhá přenos dat v sestupném směru. Zisk kanálu číslo 1. činí 15,02 dB a posledního 32. 18,37 dB.



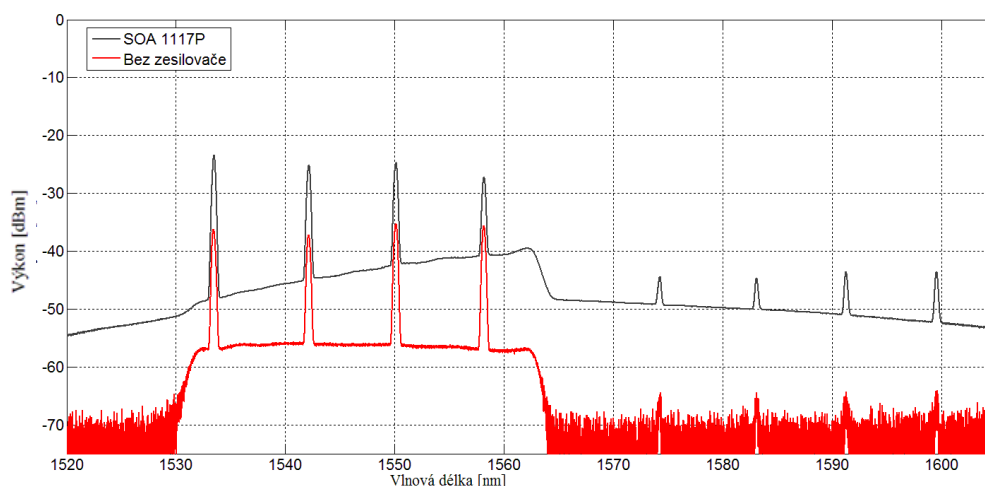
Obrázek 6.16: Spektrum zesilovače BOA 1080P v přímém směru zapojení v sestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému

V tabulce 6.10 jsou uvedeny hodnoty optického výkonu v sestupném směru bez zesilovače a pro zesílení zesilovačem BOA 1080P včetně zisku.

Tabulka 6.10: Zisk zesilovače BOA 1080P v přímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému

Číslo kanálu	1-US	12-US	22-US	32-US	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Vlnová délka [nm]	1533,47	1542,14	1550,12	1558,17	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
Bez zesilovače [dBm]	-30,41	-29,42	-29,54	-30,28	-39,57	-39,06	-39,09	-38,36
BOA 1080P [dBm]	-29,61	-25,51	-22,99	-21,48	-24,55	-23,73	-20,78	-19,99
Zisk [dB]	0,80	3,91	6,55	8,80	15,02	15,33	18,31	18,37

Obrázek 6.17 reprezentuje optické spektrum vzestupného provozu DWDM-PON systému bez použití zesilovače a pro průchodu optického signálu zesilovačem. V C pásmu lze zaznamenat 4 špičky optického výkonu korespondující s vlnovými délkami kanálů 1,12, 22 a 32 v sestupném směru. Tyto špičky jsou důsledkem použití v topologii sítě mnoha konektorů typu SC/PC, které způsobily odrazy optického výkonu.



Obrázek 6.17: Spektrum zesilovače SOA 1117P v přímém směru zapojení ve vzestupném směru komunikačního řetězce DWDM-PON systému

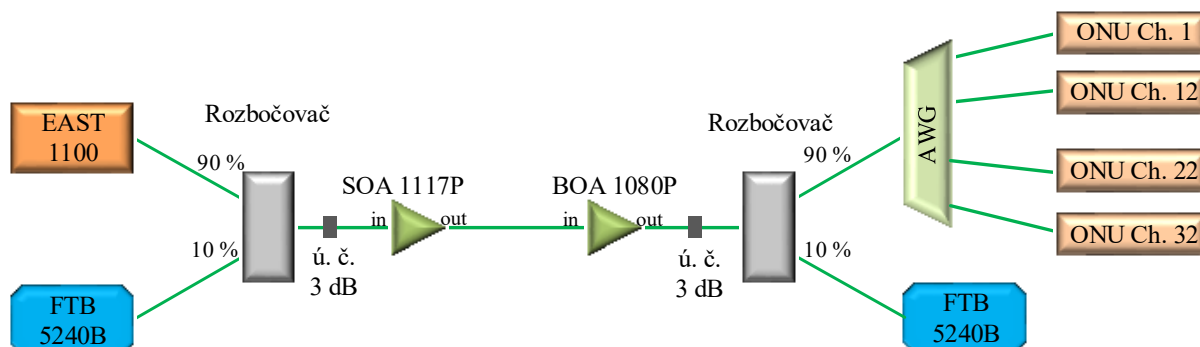
Konkrétní hodnoty zisku jednotlivých kanálů ve vzestupném směru jsou uvedeny v tabulce číslo 6.11, kde nejvyššího zisku bylo dosaženo u prvního kanálu a to 12,87 dB, zatímco u kanálu číslo 32 činí hodnota zisku 8,45 dB.

Tabulka 6.11: Zisk zesilovače SOA 1117P v přímém zapojení v závislosti na vlnové délce DWDM kanálů v DWDM-PON systému

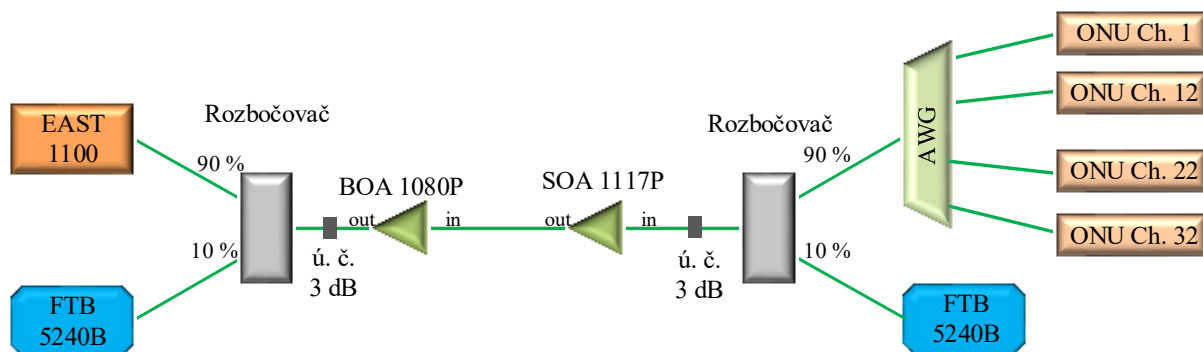
Číslo kanálu	1-US	12-US	22-US	32-US
Vlnová délka [nm]	1533,47	1542,14	1550,12	1558,17
Bez zesilovače [dBm]	-36,36	-37,20	-35,32	-35,69
SOA 1117P [dBm]	-23,49	-25,17	-24,75	-27,24
Zisk [dB]	12,87	12,03	10,57	8,45

6.2.3 Sériové zapojení SOA zesilovačů v DWDM–PON síti

Poslední testování bylo ve formě sériového zapojení polovodičových zesilovačů do DWDM–PON sítě, viz schémata topologií sítí na obrázcích 6.18 a 6.19.



Obrázek 6.18: Topologie 1 DWDM–PON sítě se sériovým zapojením SOA zesilovačů



Obrázek 6.19: Topologie 2 DWDM–PON sítě se sériovým zapojením SOA zesilovačů

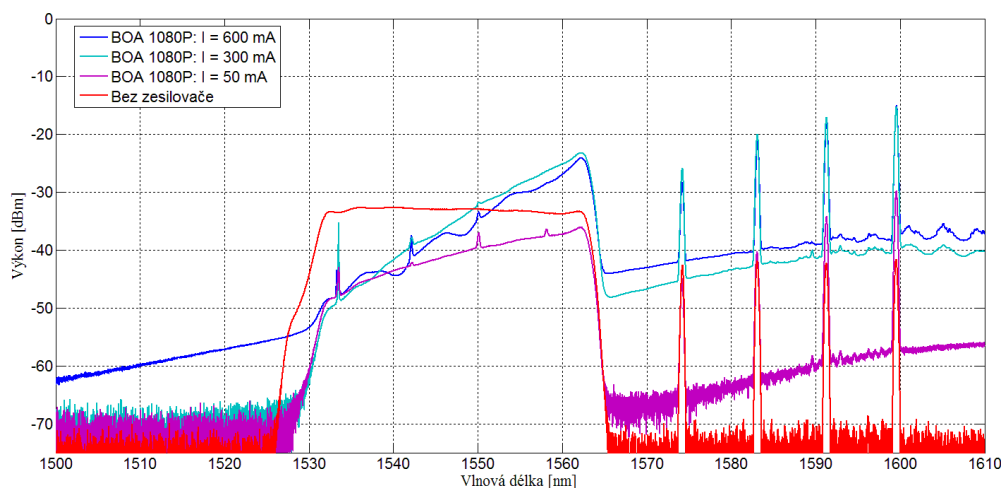
V tabulce číslo 6.12 jsou uvedeny kombinace pořadí a směru zapojení zesilovačů v topologiích 1 a 2 v závislosti na přenosu dat v komunikačním řetězci.

Tabulka 6.12: Kombinace pořadí a směru zapojení zesilovačů v topologiích 1 a 2

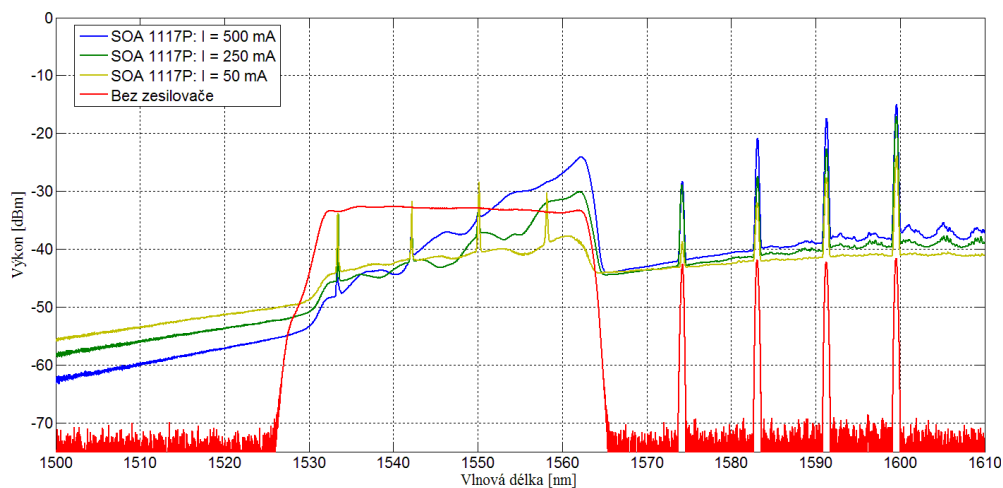
Typ topologie	Sestupný směr	Vzestupný směr
Topologie 1	1. SOA 1117P, 2. BOA 1080P Přímý směr zapojení zesilovačů	1. BOA 1080P, 2. SOA 1117P Nepřímý směr zapojení zesilovačů
Topologie 2	1. BOA 1080P, 2. SOA 1117P Nepřímý směr zapojení zesilovačů	1. SOA 1117P, 2. BOA 1080P Přímý směr zapojení zesilovačů

6.2.3.1 Sestupný směr

Na následujících obrázcích 6.20 až 6.23 jsou zobrazeny optické spektrální charakteristiky sestupného provozu DWDM–PON systému. Obrázek 6.20 reprezentuje optické spektrum při maximální hodnotě operačního proudu zesilovače SOA 1117P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače BOA 1080P. Zatímco obrázek 6.21 reprezentuje závislost spektrální charakteristiky při maximální hodnotě operačního proudu u zesilovače BOA 1080P v závislosti na změně proudu u SOA 1117P. Spektrální charakteristiky obou kombinací vykazují obdobné průběhy, konkrétní hodnoty zisků jednotlivých kanálů jsou uvedeny v tabulce 6.13.



Obrázek 6.20: Spektrum topologie 1 v sestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače SOA 1117P

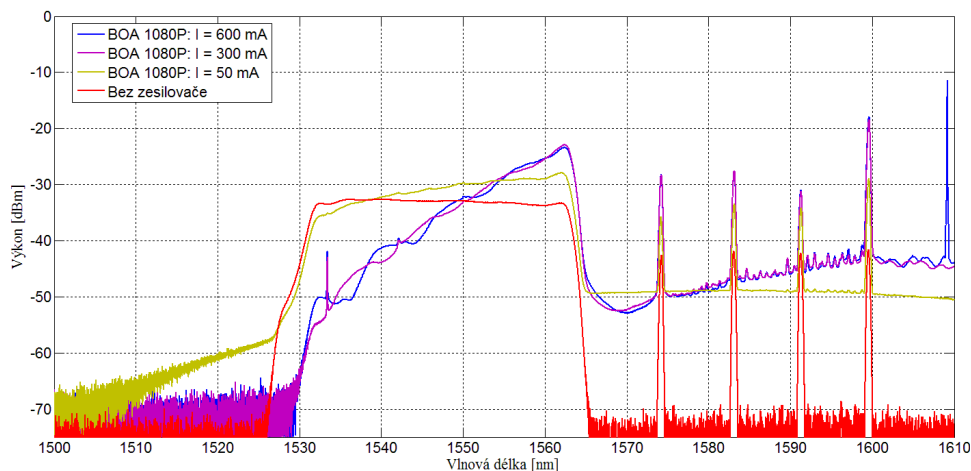


Obrázek 6.21: Spektrum topologie 1 v sestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače BOA 1080P

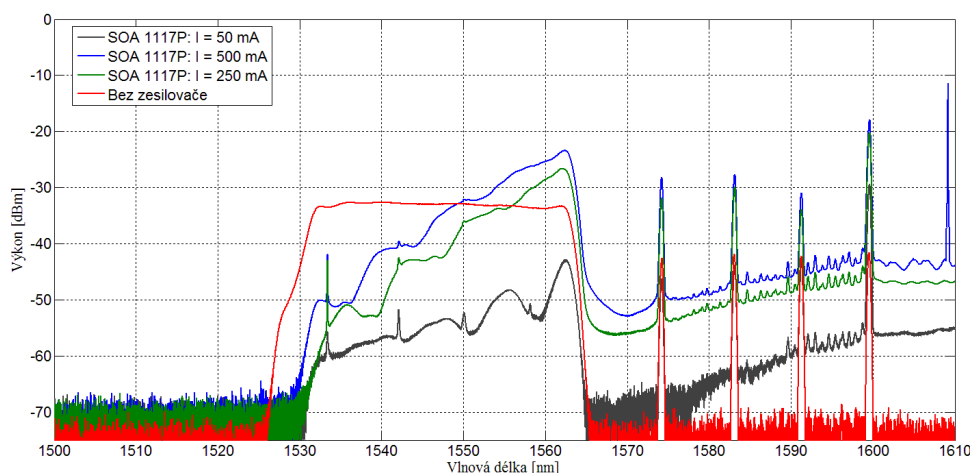
Tabulka 6.13: Hodnoty zisků kanálů při různých kombinacích operačních proudů zesilovačů v topol. 1

Typ SOA	Číslo kanálu	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Konstatní I_{OP}	Vlnová délka [nm]	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
SOA 1117P: $I = 500$ mA	BOA 1080P: $I = 600$ mA	14,1	21,0	24,8	26,5
	BOA 1080P: $I = 300$ mA	16,7	21,9	25,2	26,3
	BOA 1080P: $I = 50$ mA	-2,4	1,6	8,0	11,7
BOA 1080P: $I = 600$ mA	SOA 1117P: $I = 500$ mA	14,1	21,0	24,8	26,5
	SOA 1117P: $I = 250$ mA	13,5	14,2	19,5	24,5
	SOA 1117P: $I = 50$ mA	1,9	9,4	14,4	17,5

Obrázky 6.22 a 6.23 reprezentují spektrální charakteristiky zesíleného signálu v nepřímém zapojení polovodičových zesilovačů dle topologie uvedené na obrázku 6.19.



Obrázek 6.22: Spektrum topologie 2 v sestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače SOA 1117P



Obrázek 6.23: Spektrum topologie 2 v sestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače BOA 1080P

Tabulka číslo 6.14 uvádí hodnoty zisku DWDM kanálů ve vzestupném směru při sestavené topologii číslo 1, viz obrázek 6.19. Největšího zisku bylo dosaženo při kombinaci maximálního operačního proudu obou zesilovačů v nepřímém směru zapojení v pořadí a 1. BOA 1080P a 2. SOA 1117P.

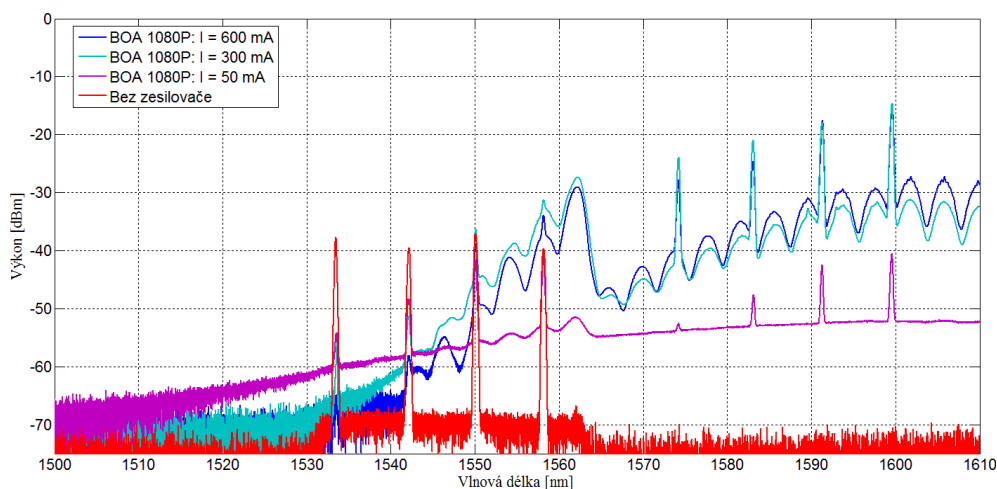
Tabulka 6.14: Hodnoty zisku kanálů při různých kombinacích operačních proudů zesilovačů v topologii 2

Typ SOA	Číslo kanálu	1-DS	12-DS	22-DS	32-DS
Konstatní I_{OP}	Vlnová délka [nm]	1574,20	1583,07	1591,28	1599,54
SOA 1117P: $I = 500$ mA	BOA 1080P: $I = 600$ mA	14,3	14,2	11,1	23,7
	BOA 1080P: $I = 300$ mA	14,3	14,4	10,9	23,1
	BOA 1080P: $I = 50$ mA	6,6	8,4	8,0	12,6
BOA 1080P: $I = 600$ mA	SOA 1117P: $I = 500$ mA	14,3	14,2	11,1	23,7
	SOA 1117P: $I = 250$ mA	10,7	12,0	8,1	21,4
	SOA 1117P: $I = 50$ mA	-3,8	-2,0	-1,1	12,2

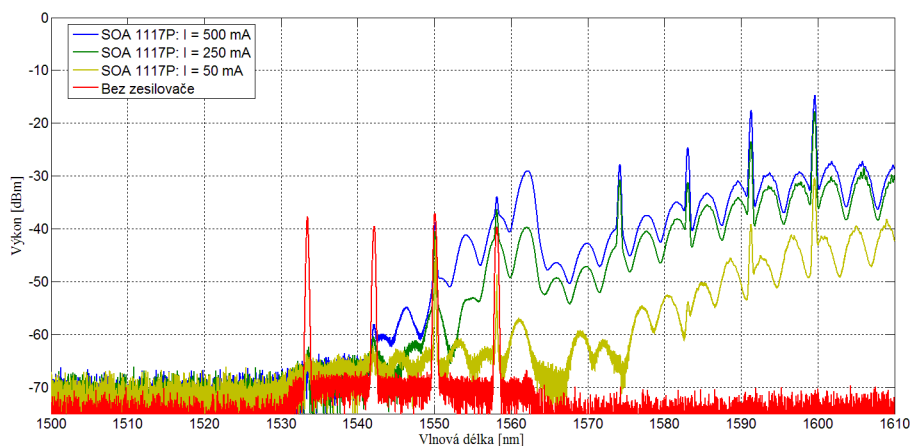
6.2.3.2 Vzestupný směr

V grafech číslo 6.24 až 6.27 jsou uvedeny spektrální charakteristiky vzestupného směru DWDM–PON systému při kombinacích sériového zapojení polovodičových zesilovačů BOA 1080P a SOA 1117P, viz schémata uvedené na obrázcích 6.18 a 6.19.

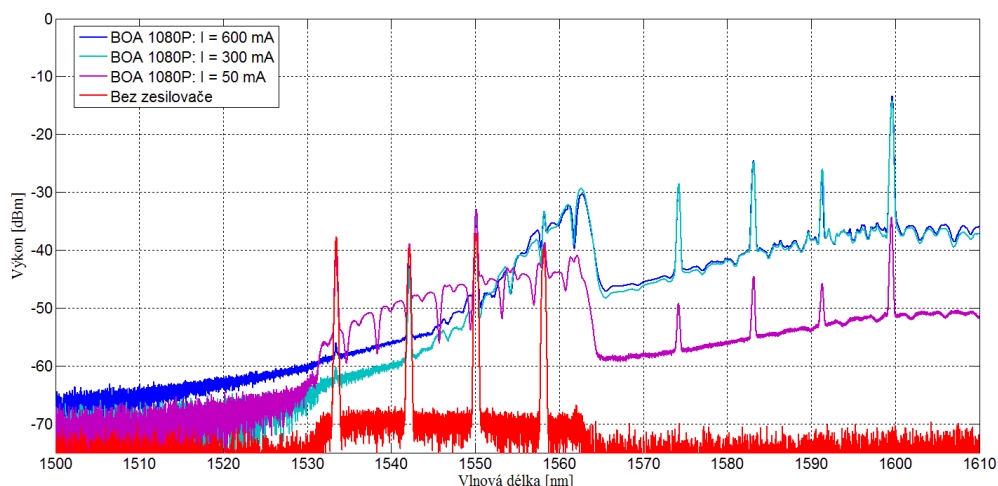
Všechny změřené spektrální charakteristiky vykazují velmi odlišné průběhy spektra od reálného stavu DWDM–PON sítě uvedeného červenou křivkou. Vzhledem k tomu, že zesilovače byly připojeny bezprostředně za sebou, mohlo dojít k přenosu fotonů ze sestupného do vzestupného přenosového směru, což zapříčinilo deformaci příspěvkových kanálů. Vyhodnocení zisku nebylo provedeno, neboť ze změřených spektrálních charakteristik nebylo možné určit přenosové kanály DWDM–PON systému.



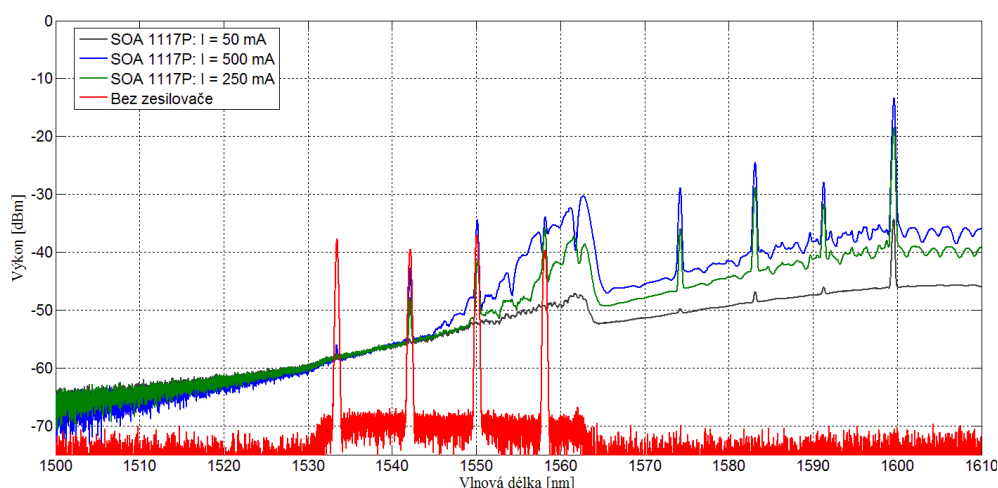
Obrázek 6.24: Spektrum topologie 1 ve vzestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače SOA 1117P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače BOA 1080P



Obrázek 6.25: Spektrum topologie 1 ve vzestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače BOA 1080P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače SOA 1117P



Obrázek 6.26: Spektrum topologie 2 ve vzestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače SOA 1117P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače BOA 1080P



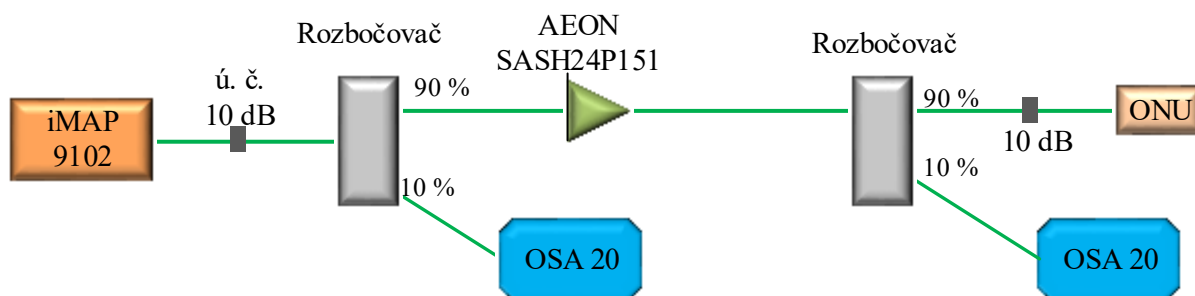
Obrázek 6.27: Spektrum topologie 1 ve vzestupném směru při max. hodnotě I_{OP} zesilovače BOA 1080P v závislosti na změně operačního proudu zesilovače SOA 1117P

6.3 SOA zesilovač v S pásmu

6.3.1 SASH 24P151

Polovodičový zesilovač typu SASH24P151 od firmy AEON má uvedenou zesilovací oblast v S pásmu, což v rámci hybridní fotonické sítě reprezentuje sestupný směr systému EPON2. Vzhledem k tomu, že v tomto pásmu vlnových délek nebyl k dispozici žádný zdroj záření, byl pro experimentální testování využit samotný systém EPON2 v sestupném směru. Měřicí pracoviště bylo sestaveno dle topologie uvedené na obrázku 6.28, přičemž cílem testování bylo zjistit zisk daného zesilovače. Pro tyto účely byly využity útlumové články v rozmezí hodnot vložného útlumu od 0 dB do 35 dB, které byly umísťovány před zesilovač a optickým spektrálním analyzátozem OSA 20 od firmy Jenista bylo zaznamenáno spektrum vlnových délek před a za testovaným zesilovačem SASH 24P151. Následnou analýzou zaznamenaných spekter byly určeny hodnoty vstupního a výstupního výkonu, přičemž úroveň byla určena na základě hodnoty Power Peak v dBm. K provedení záznamu spektra byl použit

výkonový dělič v poměru rozdělení 90 % vs. 10 %, přičemž 10% hodnota výkonu byla přivedena na spektrální analyzátor.



Obrázek 6.28: Topologie testování zesilovače AEON SASH 24P151

V tabulce 6.15 jsou uvedeny hodnoty vstupního a výstupního výkonu včetně zisku zesilovače v závislosti na velikosti útlumového článku. Veškeré data reprezentují již přepočtené hodnoty odpovídajícím skutečnému vstupnímu, resp. výstupnímu výkonu zesilovače.

Tabulka 6.15: Zisk zesilovače AEON SASH24P151 v závislosti na vstupním výkonu

Vložený útlum [dB]	$P_{IN}[dBm]$	$P_{OUT}[dBm]$	Zisk [dB]
-	0,6	-2,9	-3,5
4,1	-3,5	-3,2	0,3
11,5	-10,9	-5,6	5,3
19,8	-19,2	-10,5	8,7
23,0	-22,4	-12,9	9,5
25,9	-25,2	-15,5	9,8
35,3	-34,7	-24,1	10,6

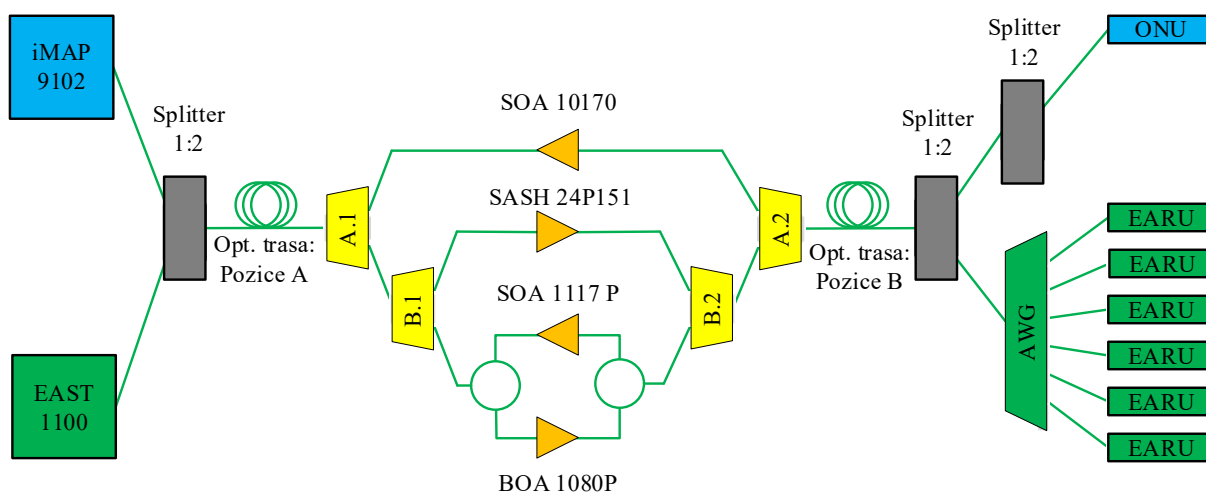
7 Testování integrity hybridní fotonické sítě

Nedílnou součástí praktické části diplomové práce bylo testování integrity sítě. Pro tento účel byly využity dvě standardizované měřicí metody, první z nich bylo testování dle doporučení RFC 2544 a druhá dle standardu ITU-T Y.1564. Testování bylo provedeno pomocí měřících přístrojů FTB-1 s modulem 860 Net Blazer a AXS 200/850.

7.1 Topologie hybridní fotonické sítě

Topologie hybridní fotonické sítě se sestávala ze dvou PON systémů, konkrétně z technologie EPON v podobě prvků od firmy Allied Telesyn a technologie WDM-PON od firmy LG-Nortel. Obě tyto technologie byly integrovány pomocí pasivního děliče s poměrem rozdělení 50/50 na společné optické vlákno standardu G.652.A v podobě různě dlouhých úseků, které sloužily pro variabilní kombinace délek vložené optické trasy. Následně bylo optické vlákno přivedeno na kaskádní zapojení pásmových děličů mezi, kterými byly umístěny polovodičové optické zesilovače a optické cirkulátory.

Smyslem využití pásmových děličů bylo oddělení jednotlivých přenosových pásem, tak aby bylo možné využít polovodičové zesilovače pro efektivní zesílení požadovaného vstupního signálu jednotlivých přenosových kanálů a vyvarování se vznikajícího útlumu v oblastech, pro které polovodičový zesilovač není konstruován. V první kaskádní větvi byl využit pásmový dělič pod pracovním označením WDM.A1 selektující na první výstupní port rozsah vlnových délek 1460–1620 nm a na druhý výstupní port 1260–1360 nm, čímž bylo dosaženo separování komunikace v sestupném směru technologie EPON2 vysílající na vlnové délce 1310 nm. Následně k tomuto výstupnímu portu byl připojen optický zesilovač typu SOA 1017S. Zatímco na první výstupní port vlnového děliče WDM.A1 by připojen další pásmový dělič WDM.B1, který na jednotlivé výstupní porty selektuje rozsah vlnových délek v rozsazích 1525–1640 nm na port číslo 1 a 1460–1510 nm na port č. 2. K portu číslo 2 byl připojen zesilovač od firmy Aeon pod označením SASH 24P151 zesilující oblast S pásma, čímž bylo dosaženo separování jednotlivých vysílacích kanálů technologie EPON2. Topologie hybridní fotonické sítě je uvedena na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Topologie hybridní fotonické sítě

Na port číslo 1 pásmové děliče WDM.B1 byl připojen optický cirkulátor, jenž slouží pro oddělení sestupného a vzestupného směru přenosu dat. K jednotlivým portům optického cirkulátoru byly připojeny zesilovače typu BOA 1080P a SOA 1117S od firmy Thorlabs, každý zesilující v oblastech C a L pásma. Následně k těmto zesilovačům byl opět připojen optický cirkulátor, čím bylo dosaženo oddělení, zesílení a následné sloučení komunikace probíhající v sestupném a vzestupném směru technologie WDM-PON.

7.2 Metodika testování integrity hybridní fotonické sítě

Metodika testování integrity hybridní fotonické sítě byla založena na provedení testů RFC2544 a ITU-T Y.1564. Pro testování byly využity měřicí přístroje FTB-1/860 NetBlazer a AXS 200/850 podporující oba výše zmíněné testy.

Cílem testování integrity bylo zjistit parametry přenosových kanálů, které jsou ovlivněny optickými polovodičovými zesilovači v závislosti na kombinacích optických tras různých délek umísťovaných do hybridní sítě. Mění se délky optických tras měly za cíl najít optimální umístění polovodičových zesilovačů do optické trasy. Optické trasy byly tvořeny 4 úseky o délkách 5, 10, 15 a 20 km, které byly v kombinacích uvedených v tabulce 7.1 umísťovány do hybridní fotonické sítě. Díky integraci dvou technologií pracující ve 4 různých pásmech v sestupném a vzestupném směru nelze korektně určit označení umístění optické trasy z pohledu SOA zesilovačů, z toho důvodu byla zvolena konvence, která uvádí, že pozice "A" reprezentuje umístění optické trasy směrem k OLT jednotce, zatímco pozice "B" umístění k ONU jednotkám.

Tabulka 7.1: *Kombinace optických tras*

Délka optické trasy [km]											
A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	A+B
5	10	15	10	5	15	15	5	20	20	5	25
5	15	20	10	15	25	15	10	25	20	10	30
5	20	25	10	20	30	15	20	35	20	15	35
5	25	30	10	25	35	15	25	40	20	20	40
5	35	40	10	35	45	15	30	45	20	25	45
5	45	50	10	40	50	15	35	50	20	30	50

7.2.1 Postup testování technologie WDM-PON

Část hybridní fotonické sítě tvořící technologie WDM-PON obsahovala celkem 6 koncových jednotek typu EARU 1112. V grafickém prostředí EMS OLT jednotky EAST 1100 byly aktivovány komunikační kanály číslo 1, 2, 12, 24, 31 a 32, tak aby bylo možné provést analýzu spektrální charakteristiky v celém spektru vlnových délek, na němž technologie WDM-PON vysílá. Následně koncové jednotky EARU 1112 byly připojeny k odpovídacím portům AWG směrové odbočnice, tak aby byla umožněna komunikace na aktivovaných kanálech.

Po sestavení kompletní hybridní fotonické sítě a aktivování SOA zesilovačů byla do sítě umístěna kombinace optických vláken uvedených v tabulce 7.1. Při každé kombinaci byla provedena spektrální analýza v maximálním rozsahu vlnových délek, jenž spektrální analyzátor FTB-5240 BP umožňoval, konkrétně se jedná o rozsah od 1250 nm do 1650 nm. Měření bylo provedeno v průměrovacím režimu s počtem měření 5.

Před samotným měřením integrity byla ověřena komunikace mezi koncovými jednotkami EARU 1112 a OLT jednotkou EAST 1100 prostřednictvím testu ping na připojeném notebooku, jenž ověřoval konektivitu vůči IP adrese výchozí brány OLT jednotky. Na základě informací o konektivitě jednotlivých koncových jednotek a záznamu spektrální analýzy byly zvoleny dvě koncové jednotky, které komunikovaly prostřednictvím příspěvkového kanálu s nejvyšší a nejmenší výkonovou úrovní. Pomocí tohoto postupu bylo provedeno měření integrity hybridní fotonické sítě testy RFC2544 a ITU-T Y.1564 na všech kombinacích délek optických tras a zároveň na dvou koncových jednotkách.

7.2.2 Postup testování technologie EPON2

Díky odlišnému principu komunikace oproti WDM-PON systému ve formě časového multiplexu bylo provedeno testování integrity sítě pouze na jedné koncové jednotce systému EPON2. Sestavení aktivního spojení bylo testováno v konfiguračním prostředí OLT jednotky prostřednictvím příkazu *show onu*, jenž zobrazoval informace, v jakém komunikačním stavu se ONU jednotka AT-ON 1000 aktuálně nachází.

7.3 Testování stavu konektivity a určení testované EARU jednotky

V rámci testování spojení mezi OLT jednotkou a EARU 1112 bylo využito testu ping, který byl spuštěn na příslušném PC s cílovou adresou výchozí brány OLT jednotky EAST 1112, přičemž vždy bylo otestováno všech 6 koncových jednotek. Co se týče jednotky AT-ON 1000, tak zde byl proveden test spojení výpisem stavu jednotky v příkazovém řádku OLT jednotky iMAP 9102.

Následující tabulky číslo 7.2 až 7.5 obsahují informaci o stavu koncové jednotky, v případě WDM-PON sítě konkrétně na kterém kanálu, zdali jsou v aktivním spojení s OLT jednotkou či nikoliv v závislosti na kombinaci optické trasy. A zároveň oranžové ohraničení aktivního stavu dané koncové jednotky EARU 1112 informuje o tom, že na této jednotce byly provedeny testy dle doporučení RFC 2544 a standardu ITU-T Y.1564.

Tabulka 7.2: Stav spojení koncových jednotek - Pozice A: 5 km

Optická trasa [km]			WDM-PON EARU 1112						EPON2 AT-ON 1000
Pozice A	Pozice B	Celkem	1	2	12	24	31	32	
5	10	5+10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
5	15	5+15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
5	20	5+20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
5	25	5+25	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗
5	35	5+35	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗
5	45	5+45	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabulka číslo 7.2 obsahuje informace o konektivitě v pozici A byla optická trasa délky 5 km. První odpojení koncové jednotky nastalo v kombinaci 5+25km, kdy došlo k rozpadu spojení EARU jednotky na kanále číslo 1. Při poslední kombinaci tvořené 5+45 km již nebyla ve spojení s OLT jednotkou ani jedna koncová stanice. V procentuální vyjádření všech stavů EARU jednotek lze tvrdit, že v 72,2 % bylo spojení aktivní. Následující tabulka číslo 7.3 zobrazuje kombinace 10 km trasou na pozici A. Zde bylo zaznamenán 5,5% pokles všech aktivních spojení EARU jednotek, což činí celkem

66,6 % stavů UP. Co se týče koncové jednotky systému EPON2, tak bez ohledu na délku optické trasy začínající v pozici 5 nebo 10 km, tak ve všech měřeních nedošlo k sestavení spojení.

Tabulka 7.3: Stav spojení koncových jednotek – Pozice A: 10 km

Optická trasa [km]			WDM-PON EARU 1112						EPON2 AT-ON 1000
Pozice A	Pozice B	Celkem	1	2	12	24	31	32	
10	5	10+5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
10	15	10+15	✓		✓	✓	✓	✓	✗
10	20	10+20	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
10	25	10+25	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
10	35	10+35	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
10	40	10+40	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabulka 7.4: Stav spojení koncových jednotek – Pozice A: 15 km

Optická trasa [km]			WDM-PON EARU 1112						EPON2 AT-ON 1000
Pozice A	Pozice B	Celkem	1	2	12	24	31	32	
15	5	15+5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
15	10	15+10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
15	20	15+20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
15	25	15+25	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗
15	30	15+30	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗
15	35	15+35	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗

Poslední dvě tabulky číslo 7.4 a 7.5 obsahují informace o stavu jednotek při kombinacích délky trasy na pozici A:15 km, resp. A: 20km. Při délce trasy 15 km na pozici A bylo ze všech provedených měření největší procentuální zastoupení aktivních jednotek EARU, zatímco při pozici A:20km bylo ve stavu UP pouhých 66,7 %, stejně jako při kombinaci A:10 km.

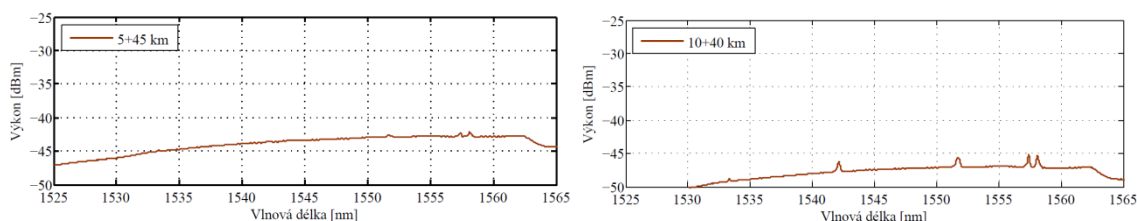
Tabulka 7.5: Stav spojení koncových jednotek – Pozice A: 20 km

Optická trasa [km]			WDM-PON EARU 1112						EPON2 AT-ON 1000
Pozice A	Pozice B	Celkem	1	2	12	24	31	32	
20	5	20+5 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20	10	20+10 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
20	15	20+15 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
20	20	20+20 km	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗
20	25	20+25 km	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗
20	30	20+30 km	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗

Při kombinaci A:20 km a B:5 km byl zaznamenán jediný případ, kdy je jednotka AT-ON 1000 ve stavu UP. Při této kombinaci to pro zesilovač v O pásmu zesilující vzestupný směr systému EPON2

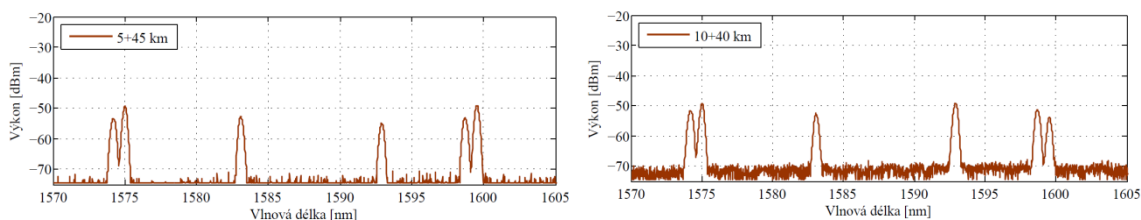
znamená, že ze všech kombinací do SOA zesilovače vstupuje největší optický výkon a zároveň je následně zesílený výkon nejvíce utlumen 20 km optické trasy.

Během ověření konektivity prostřednictvím testu ping bylo současně zaznamenáno spektrum vlnových délek na výstupu z optické trasy, a to jak v sestupném, tak i ve vzestupném směru přenosu dat. Následující 2 záznamy spektra reprezentují 2 nejhorší případy ze všech kombinací, při kterých nebyla ve spojení s OLT jednotkou ani jedna koncová stanice.



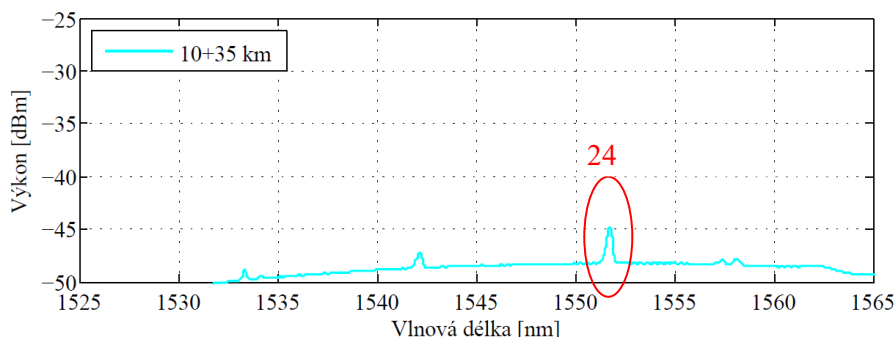
Obrázek 7.2: Vzestupný směr, kombinace 5+45 km a 10+40 km

Ze zaznamenaných spektrálních charakteristik lze vyvodit, že sestupný směr komunikačního kanálu nemá vliv na sestaví komunikace. Zatímco, dle obrázku číslo 7.2 je zřejmé, že komunikace mezi EARU a OLT jednotkou nefunguje, neboť hodnota OSNR je řádově v jednotkách dB.



Obrázek 7.3: Sestupný směr, kombinace 5+45 km a 10+40 km

Obrázek 7.4 reprezentuje spektrální charakteristiku vzestupného směru kombinace 10+35 km, kde podle testu konektivity je příspěvkový kanál číslo 24 ve stavu UP, na rozdíl od kanálu v kombinaci 10+45 km na obrázku 7.2 (vpravo), kde výkonová úroveň Power Peak je téměř totožná. Hlavní rozhodující činitel se jeví parametr OSNR, který je u spektra na obr. 7.2 (vpravo) řádově do 1 dB, zatímco u kombinace 10+35 km činí přibližně 3 dB.



Obrázek 7.4: Vzestupný směr, kombinace 10+35 km

7.4 Testování integrity pomocí test ITU-T Y.1564

Standard ITU-T Y.1564 je zaměřen na testování kvalitativních parametrů datových přenosů s ohledem na požadavky definovaných SLA smlouvě, jenž určuje při jakých podmínkách datového přenosy splňují tyto kritéria. Samotné testování dle doporučení ITU-T Y.1564 je prováděno ve dvou fázích.

Kontrola nastavení síťové konfigurace služeb (Service Configuration Test) - Testování probíhá pro každou definovanou službu odděleně, přičemž prostřednictvím Ramp testu probíhá nastavení propustnosti v několika krocích se zvyšující se tendencí až do hranice 125% propustnosti. Při každé úrovni propustnosti jsou otestovány všechny parametry dle nastavení SLA požadavků.

Kontrola nastavení parametrů kvality služeb QOS (Service performance Test) - Na rozdíl od prvního testu, zde již probíhá testování všech definovaných služeb simultánně, tak aby se testování přiblížilo reálnému datovému provozu testované sítě. Přičemž opět je ověřována kvalita služeb z pohledu SLA požadavků. [21][25]

Během testování jsou v obou fázích měřeny následující parametry:

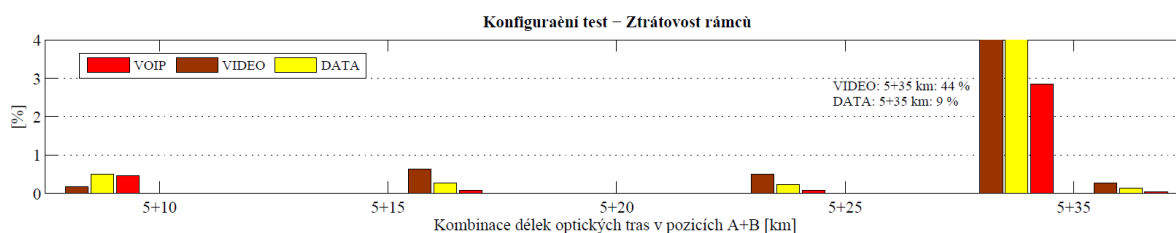
- Propustnost
- kolísání zpoždění
- obousměrné zpoždění
- ztrátovost rámců

Tabulka 7.6: Provozní vlastnosti podle třídy služeb - Metro ethernet [24]

Třída služby	Popis služby	CoS ID	Zpoždění	Jitter	Ztrátovost
Premiun	IP telefonie v reálném čase nebo IP video aplikace	6,7	< 5 ms	< 1ms	< 0,001 %
Silver	Přenos důležitých datových souborů s kolísavým zatížením, vyžadující nízké ztráty a malé zpoždění	4,5	< 5 ms	N/S	< 0,01 %
Bronze	Přenos dat s kolísavým profilem zátěže a potřebou zaručit jistou šířku pásma	3,4	< 15 ms	N/S	< 0,1 %
Standard	Best effort service	0,1,2	< 30 ms	N/S	< 0,5 %

Tabulka 7.6 uvádí hraniční hodnoty kvalitativních parametrů pro jednotlivé třídy služeb v sítích typu Metro Ethernet

Na obrázku 7.5 je zobrazeno grafické vyjádření ztrátovosti rámců na EARU jednotkách systému WDM-PON v kombinacích trasy 5+10 a ž 5+35, přičemž dvojce skupiny tripleplay reprezentují dvě testované EARU jednotky s následujícím klíčem: po levé straně označení osy x je EARU jednotka s nižším cílem kanálu a na pravé straně s vyšším.



Obrázek 7.5: ITU-T Y.1564 - EARU - Konfigurační test - Ztrátovost rámců - 5+25 km

Konkrétně zde v kombinaci 5+10 značí, že bylo testování provedeno na koncových jednotkách 2 a 32. Z grafu je patrné, že při kombinaci 5+35 došlo razantní ztrátě rámců u EARU jednotky 12, dle zaznamenaného spektra uvedeného v příloze C, lze vidět že se již jednalo o hraniční výkonovou úroveň bezprostředně před rozpadem spojení. Další grafické vyhodnocení testování ITU-T je uvedeno v příloze C.

7.5 Testování integrity pomocí test ITU-T RFC 2544

Doporučení RFC 2544 vydané v roce 1999 organizací IETF mělo za úkol sjednotit nesoulad mezi testování a vyhodnocování dat z datových sítí. Doba jednotlivých testů se dle doporučení udává řádově desítkách minut až jednotkách hodin, což z testu činí velmi problematické testování reálných sítí. [21][25]

V doporučení jsou specifikovány následující testy:

- Propustnost
- Zpoždění
- Ztrátovost rámců
- Zatížitelnost
- Zotavené po přetížení
- Zotavení po restartu

Tabulka 7.7: RFC 2544

KOMBINACE	UPSTREAM			DOWNSTREAM		
Velikost rámce	64 B	512 B	1518 B	64 B	512 B	1518 B
5/10	95	100	100	90	90	100
	95	100	100	90	90	100
5/20	95	100	100	90	90	100
	95	100	100	90	90	90
5/35	79	100	80	90	90	100
	95	100	100	75	90	100
5/10	95	100	100	90	90	100
	95	100	100	90	90	100
10/20	95,454	100	100	90,128	90,001	100
	95,454	100	100	90,128	90,001	100
10/35	3,609	25,503	14,375	90,128	90,001	100
	-	-	-	-	-	-
15/5	95,454	100	100	90,128	90,001	100
	94,454	100	100	90,128	90,001	100
15/20	95	100	100	90	90	100
	95	100	100	90	90	100
15/30	95	100	100	90	90	100
	-	-	-	-	-	-
20/5	95	100	100	90	90	100
	95	100	100	90	90	100
20/10	95	100	100	90	90	100
	95	100	100	90	90	100

Tabulka 8.1 reprezentuje numerické vyjádření měření propustnosti na EARU jednotkách testovaných dle ITU-T Y.1564. Dle změřených dat lze určit, že testování pomocí RFC 2544 je velice stabilní dokud existuje spojení mezi EARU a OLT, až na případy, kdy je spojení na hranici rozpadu, kdy v těchto bodech měření prudce klesla hodnota propustnosti. Pomocí testu RFC 2544 nebyla testovaná technologie EPON2, neboť nevykazuje při žádné kombinaci optických tras, takové stabilní podmínky, aby test RFC 2544 mohl proběhnout.

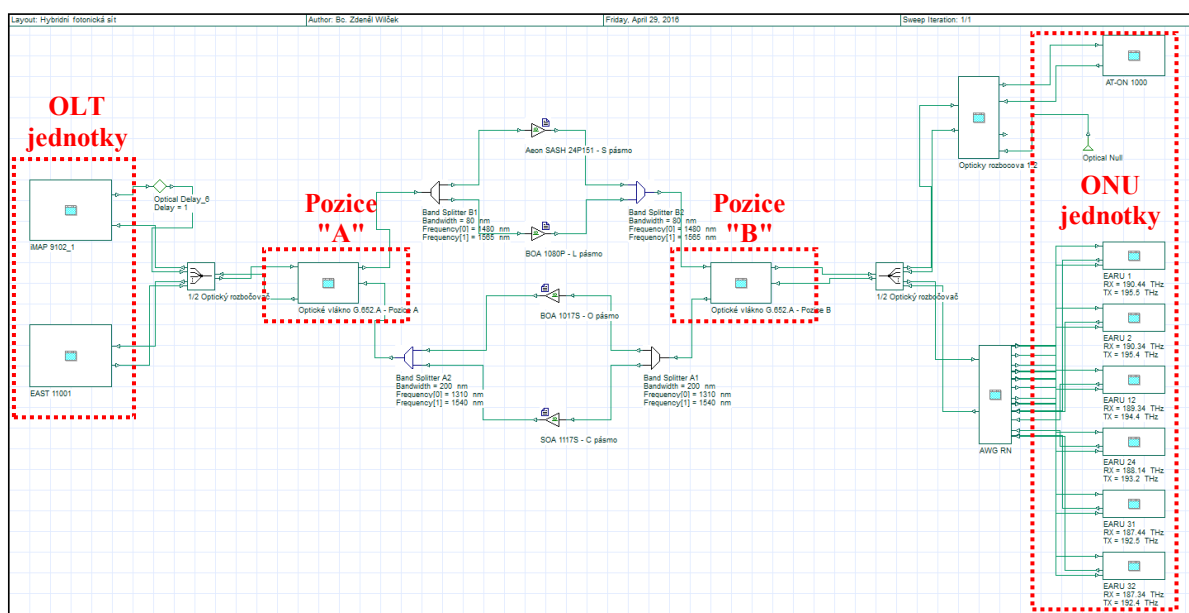
8 Simulační část

Dalším bodem diplomové práce bylo vytvořit v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem hybridní fotonickou síť založenou na základech reálných prvků, které byly využity v praktické části.

Softwarová aplikace OptiSystem od firmy Optiwave umožňuje vytvářet ze základních prvků složitější struktury v podobě modulárních bloků reprezentující komplexnější zařízení jako jsou například optická linková zakončení OLT či optické koncové jednotky ONU, jenž jsou v této práci využity. V následujících kapitolách bude proveden detailní rozbor všech modulárních bloků, které tvoří hybridní fotonickou síť včetně nastavení parametrů jednotlivých základních stavebních prvků.

8.1 Rozbor hybridní sítě v simulačním prostředí

Pro účely testování byla v programu OptiSystem vytvořena topologie, obsahující 6 koncových jednotek WDM-PON systému dle kapacitních možností reálných prvků a jedna koncová jednotka AT-ON 1000 systému EPON. Na obrázku 8.1 je uvedena topologie hybridní fotonické sítě sestávající se z jednotlivých modulárních bloků, které jsou popsány dále v kapitole.



Obrázek 8.1: Topologie hybridní fotonické sítě

Hybridní fotonická síť je postavena na základě reálné sítě, na které bylo provedeno měření. Sestává se z OLT jednotek, dvou úseků optického vlákna, 3 optických rozbočovačů 1:2, AWG směrové odbočnice, 1 koncové jednotky AT-ON 1000, 6 jednotkami EARU 1112 a soustavou 4 zesilovačů umístěnými mezi 4 pásmovými splitty.

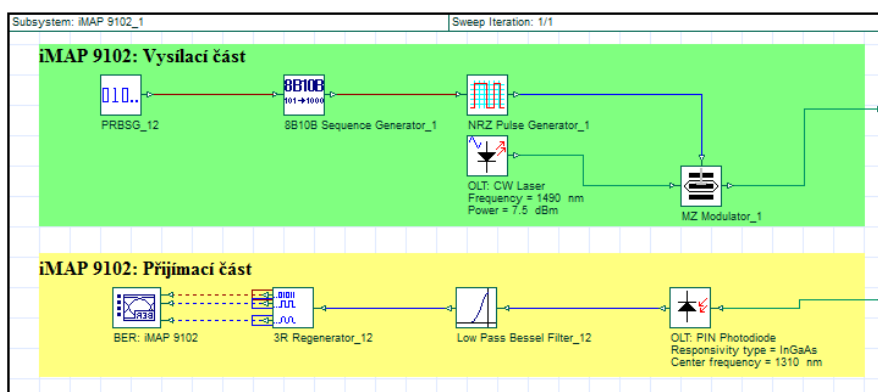
Nastavení globálních parametrů pro celkový výpočet simulace je uvedeno v tabulce číslo 8.1. Celkový výpočet byl proveden ve dvojím opakování, přičemž u prvního byla nastavena přenosová rychlost 100 Mbit/s čímž, byla kalkulace a následné vyhodnocení zaměřeno na prvky technologie WDM-PON a následně druhý opakování byl proveden s přenosovou rychlostí 1 Gbit/s, čímž byla pozornost věnována systému EPON2.

Tabulka 8.1: Globální parametry

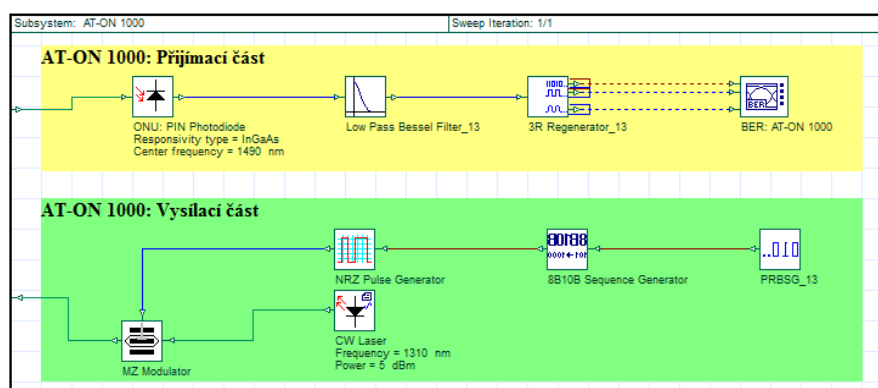
Název parametru	Hodnota	Jednotky
Přenosová rychlost: WDM-PON	100×10^6	bit/s
Přenosová rychlost: EPON2	1×10^9	bit/s
Délka sekvence	32	bitů
Počet vzorků na bit	64	—

8.1.1 Technologie EPON2 v Optiwave OptiSystem

Technologie systému EPON2 vytvořená v simulačním prostředí Optiwave Optisystem se skládá ze dvou prvků, OLT jednotky iMAP 9102, viz obr. 8.2 a ONU jednotky AT-ON 1000, viz obr. 8.3. Oba prvky obsahují téměř totožné komponenty. Zdrojové data jsou generovány pseudo náhodným bitovým sekvenčním generátorem, jenž datovou informaci přenáší do sekvenčního generátoru, který využívá mapování 8B/10B. Následná přemapovaná data jsou předána do pulzního generátoru typu NRZ a jenž je připojen na Mach-Zenderův modulátor modulující data z NRZ generátoru na kontinuální vlnu optického signálu generovaného CW Laserem. V případě ONU jednotky se jedná o vlnovou délku 1310 nm a pro OLT jednotku platí 1490 nm. Rozdíl mezi oběma jednotkami je pouze v úrovni výstupního výkonu a zapnutí kalkulace bočních módů u ONU jednotky, viz tabulka 8.2.



Obrázek 8.2: OLT jednotka iMAP 9102



Obrázek 8.3: ONU jednotka AT-ON 1000

V přijímací části je použita PIN fotodioda, dolno–propustný Besselův filtr, 3R regenerátor a BER analyzátor pro vyhodnocení kvalitativní parametrů. V fotodiodě PIN je nastaven režim citlivosti dle materiálu InGaAs.

Tabulka 8.2: *Parametry technologie EPON*

Komponenta	Parametr	Hodnota
OLT: CW Laser	Vlnová délka	1 490 nm
	Výstupní výkon	7,5 dBm
ONU: CW Laser	Kalkulace bočních vidů	OK
	Počet bočních vidů	20

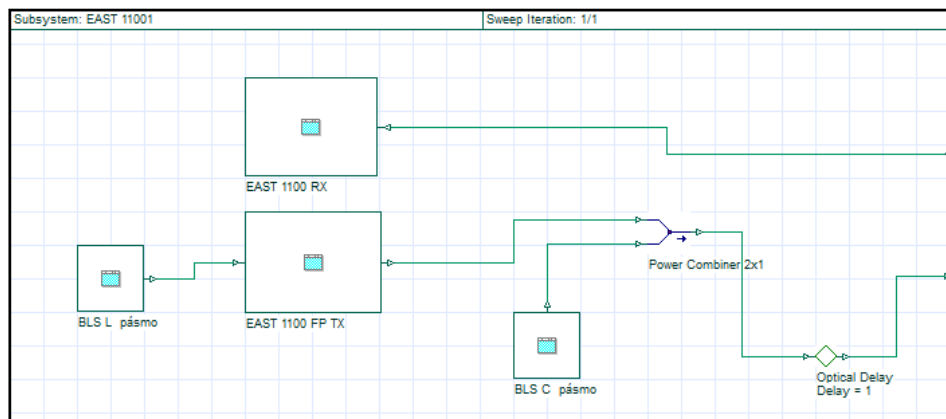
8.1.2 Technologie WDM–PON v Optiwave OptiSystem

Technologie WDM–PON je sestavena ze tří základních funkčních bloků v podobě OLT jednotky EAST 1100, AWG směrové odbočnice umístěné v RN a koncových jednotek v celkovém počtu 6 kusů, dle reálné sítě.

8.1.2.1 OLT jednotka EAST 1100

OLT jednotka je sama o sobě tvořena 4 bloky, jenž jsou: EAST 1100 RX sloužící jako přijímací a zpracující signál ve vzestupném směru, EAST 1100 FP TX plnící funkci vysílače v sestupném směru přenosu dat a dvě širokopásmovými světelnými zdroji pracující v pásmu C, resp. L, viz obr 8.4.

BLS zdroj v L pásmu slouží pro lokální naladění FP laserů vysílajících v L pásmu a BLS v C pásmu generuje širokospektrální záření sloužící pro naladění FP laserů v koncových jednotkách.

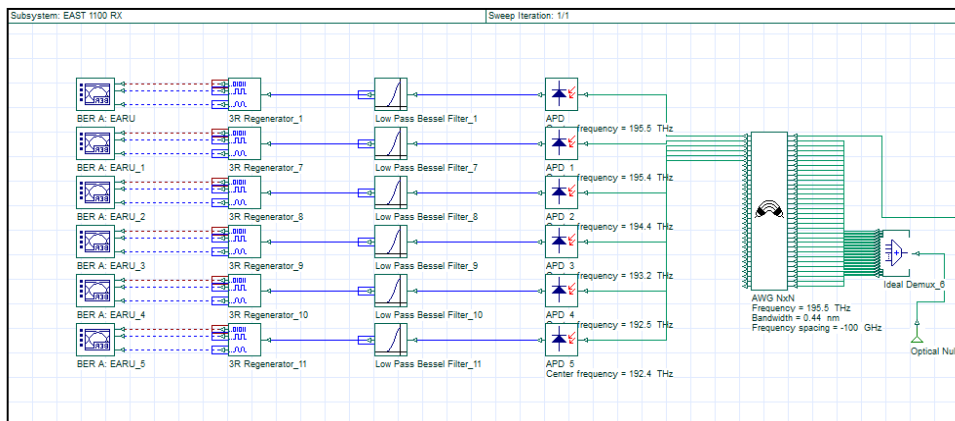


Obrázek 8.4: *OLT jednotka EAST 1100*

Přijímací část OLT jednotky EAST 1100 je složena z APD fotodiody, dolnoproustného filtru, 3R regenerátoru a BER analyzátoru, tyto komponenty jsou v 6 násobném počtu, kde každý zpracovává jeden příspěvkový kanál na vlnové délce určené připojením APD fotodiody na jednotlivé výstupní porty AWG směrové odbočnice v režimu demultiplexoru, viz obr 8.5.

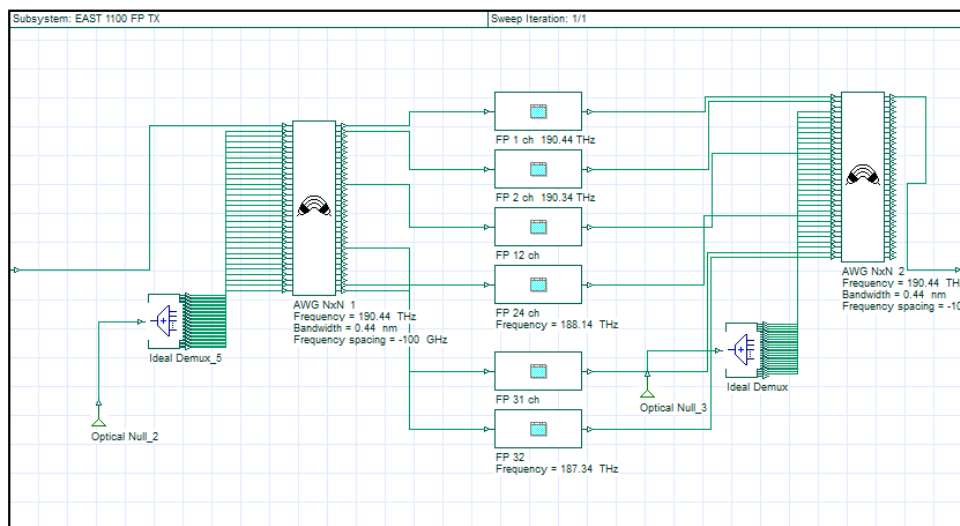
Vysílací část OLT jednotky EAST tvoří dvě směrové odbočnice ve formách demultiplexoru a multiplexoru, jenž první z nich rozdělí vstupní širokopásmové záření v L pásmu na jednotlivé výstupní

porty, ke kterým jsou připojeny FP laserové diody, jenž se na danou vlnovou délku naladí a následně vysílají data v sestupném směru přes další AWG směrovou odbočnici v režimu MUX. Opět i zde bylo přihlédnuto k reálným možnostem sítě v laboratoři a bylo provedeno simulování stejného počtu kanálů na odpovídajících vlnových délkách, viz obr. 8.5.

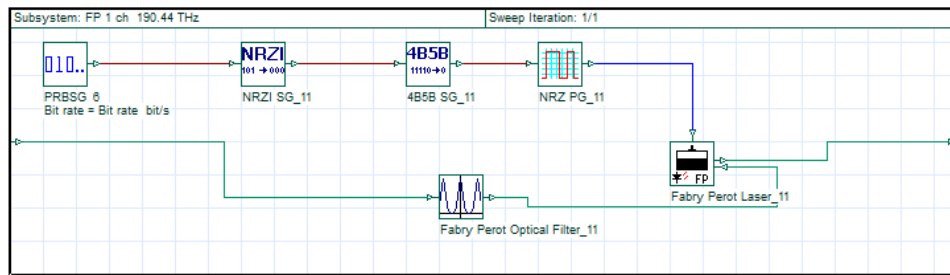


Obrázek 8.5: Přijímací část OTL jednotky EAST 1100

Samotná komponenta FP laserové diody je tvořena pseudo náhodným generátorem bitové poslounosti připojené k inverznímu NRZ kódování, jenž je připojen k prvku provádějící mapování ve formě 4B/5B. Následě je pomocí skrz NRZ prvek přiveden signál na Fabry–Perotův vstupní port sloužící k modulování výstupního optického výkonu, který je má totožnou vlnovou délku jako je vstupní ladící širokospektrální zařízení. Blokové schéma komponenty FP laserové diody je uveden na obrázku 8.7.

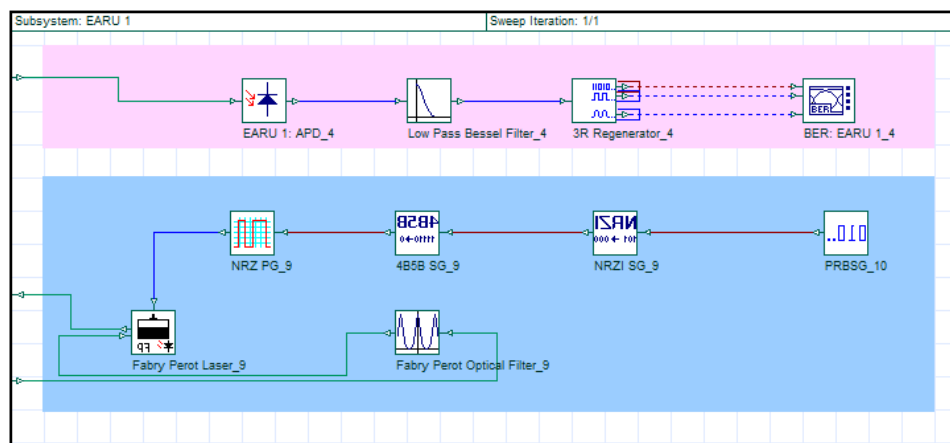


Obrázek 8.6: Přijímací část OTL jednotky EAST 1100



Obrázek 8.7: FP laserová dioda v OLT jednotce

Obrázek 8.8 reprezentuje blokové schéma EARU jednotky WDM-PON systému, jenž je složena ze stejných prvků jako vysílací, resp. přijímací část OLT jednotky EAST 1100. Jediným rozdílným stavem, je princip ladění, jež zde není lokálního charakteru, nýbrž externího z OLT jednotky.

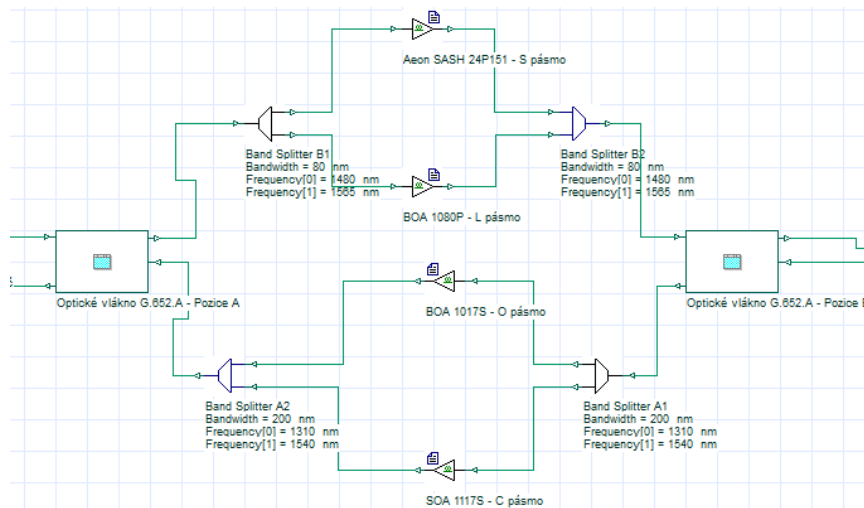


Obrázek 8.8: EARU jednotka 1112

AWG směrová odbočnic umístěná ve vzdáleném uzlu je uvedena v příloze A, z ohledem na velikost celkové komponenty. Samotná komponenta je sloužena ze 3 AWG směrových odbočnic, dvě jsou v režimu demultiplexeru, jedná se o sestupný směr přenosu dat a jednom v MUX režimu pro vzestupný směr. Veškeré AWG jednotky pracují s roztečí mezi vlnovými délkami s hodnotou 100 GHz a hodnota vložného útlumu způsobeného AWG v RN je rovná 5 dB.

8.1.3 SOA zesilovače v Optiwave OptiSystem

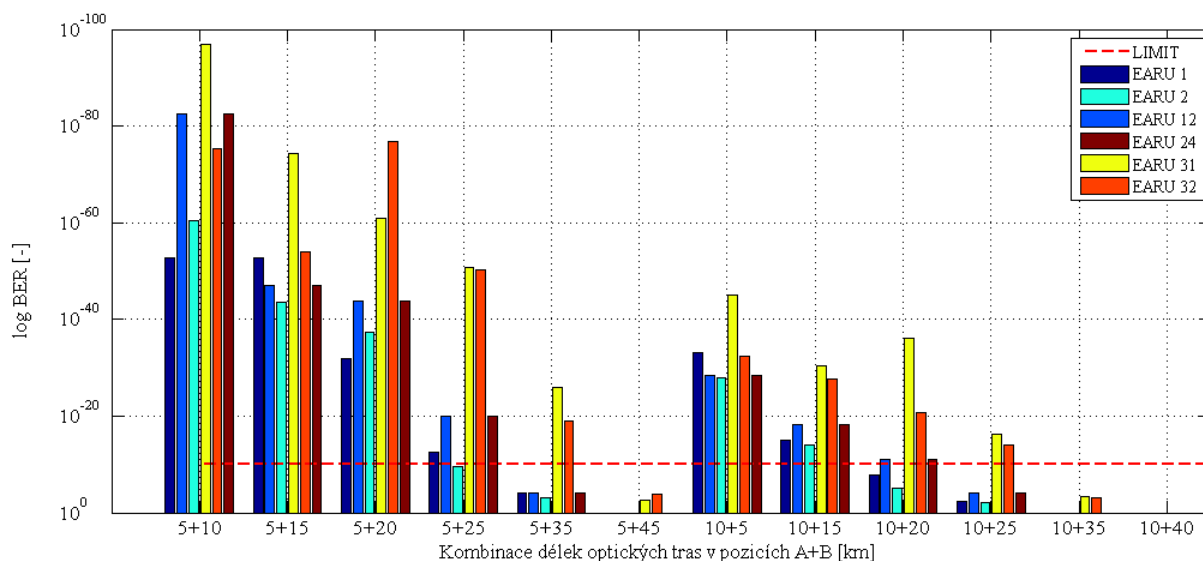
Posledním prvkem hybridní fotonické sítě v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem je struktura pásmových děličů oddělující jednotlivé přenosové pásma, tak aby bylo možné pomocí SOA zesilovačů v podobě prvku Measured Amplifier zesílit požadované pásma a následně je díky dalším pásmovým děličům sloučit na jedno optické vlákno. Na pozicích A směrem k OLT a B směrem ONU jsou umístěny optické vlákna s parametry odpovídajícím změřeným hodnotám, tak aby bylo dosaženo, co nejpodobnějších výsledků v porovnání s reálným měřením, viz obr. 8.9.



Obrázek 8.9: Struktura SOA zesilovačů a tras optických vláken

8.2 Měření hybridní fotonické sítě v simulačním prostředí

Měření hybridní fotonické sítě v simulačním prostředí je založena na stejném principu měření reálné sítě v laboratoři formou změny délky optické trasy v pozicích A a B. V OptiSystem bylo v režimu *sweep* nastaveno 24 iterací, kde ke každé iteraci byla přiřazena délka optické trasy v pozicích A a B, dle tabulky 7.1, kde jsou uvedeny jednotlivé kombinace optických tras.



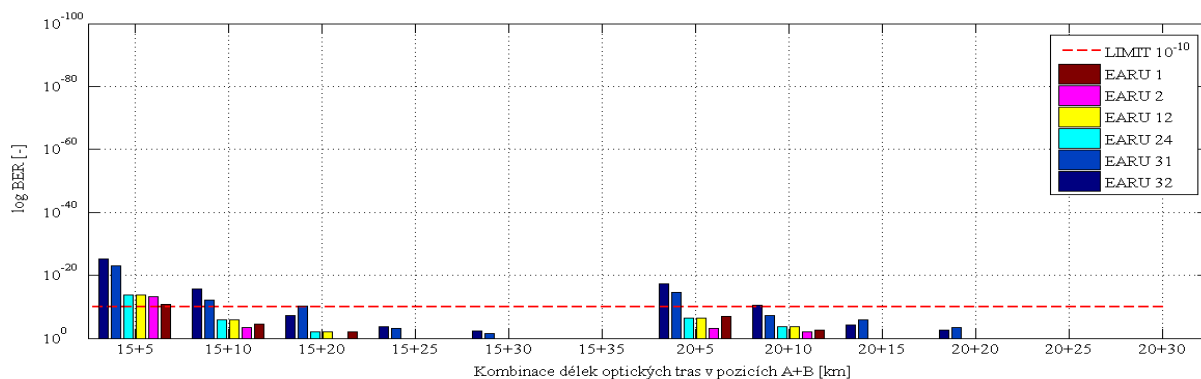
Obrázek 8.10: Hodnoty BER v logaritmickém vyjádření pro kombinace délek optických tras

Obrázek 8.10 reprezentuje grafické vyjádření hodnot bitové chybovosti v logaritmickém měřítku v závislosti na délce optické trasy při kombinaci délek na pozici A: 5 km a 10 km. Přičemž jednotlivé skupiny 6 sloupcových grafů vyjadřují jednu iteraci výpočtu simulace v závislosti na jednotlivé kanály WDM-PON systému v sestupném směru přenosu dat, neboli testování byly podrobeny koncové jednotky EARU 1112.

Vzhledem k tomu, že v simulačním prostředí je možné vyhodnocovat kvalitativní parametry komunikačních kanálů pouze na základě BER analyzátoru, byla jako kritický parametr zvolena bitová chybovost s limitní hodnotou rozhodující o stavu komunikačního kanálu v hodnotě 1×10^{-10} . Limitní

hodnota na základě, které bylo určeno zdali se jedná o sestavenou komunikaci je uvedena v horizontální hladině červenou hranicí.

Na následujícím obrázku 8.11 je zobrazeno pokračování zvyšování délky optické trasy na pozici A o hodnotě 15 a 20 km. V tomto případě, již dochází ke značnému zhoršení kvalitativních parametrů navýšením bitové chybovosti, kde v ani jedné z 12 kombinací délek optických trasy nebylo dosaženo všemi koncovými jednotkami aktivního stavu, nebo překročení limitní hodnoty.



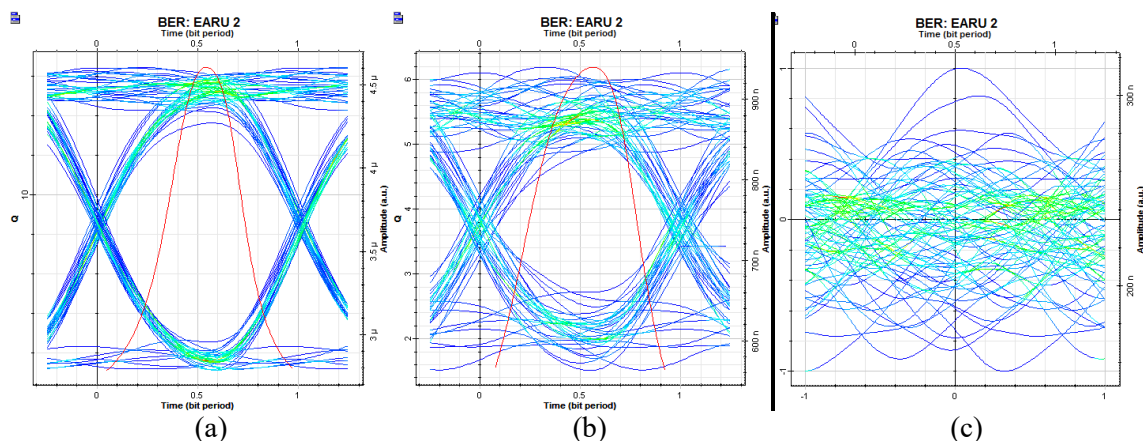
Obrázek 8.11: Hodnoty BER v logaritmické vyjádření pro kombinace délek optických tras

Na základě grafů uvedených na obr. 8.10 a obr. 8.11 byly sestaveny tabulky zobrazující přehled o aktivních respektive neaktivních, přičemž v první kombinaci bylo sestaveno celkem 69,4 % spojení u všech kombinací a koncových jednotek, viz tabulka 8.3. Při zdvojnásobení délky optické trasy na pozici A: 10 km bylo již 50 % všech jednotek pod hranicí bitové chybovosti 10^{-10} , viz tab. 8.4

Tabulka 8.3: Kombinace trasy – A:5 km (vlevo); A:10 km (vpravo)

Optická trasa	1	2	12	24	31	32
5+10 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5+15 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5+20 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5+25 km	✓	✗	✓	✓	✓	✓
5+35 km	✗	✗	✗	✗	✓	✓
5+45 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Optická trasa	1	2	12	24	31	32
10+5 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10+15 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10+20 km	✗	✗	✓	✓	✓	✓
10+25 km	✗	✗	✗	✗	✓	✓
10+35 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗
10+40 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗



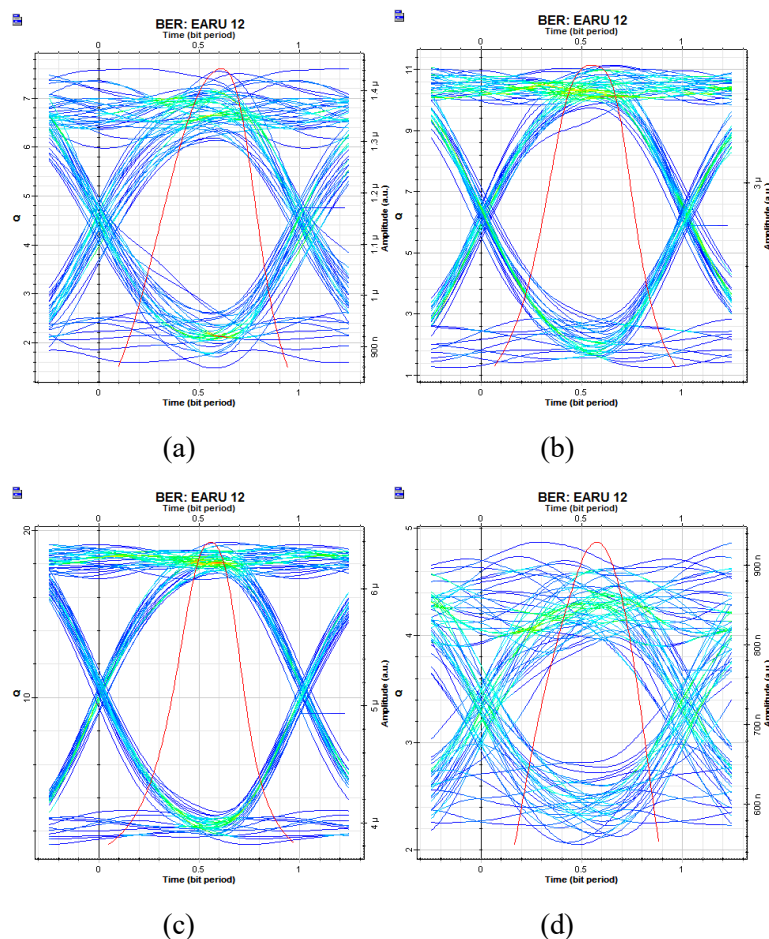
Obrázek 8.12: Diagram OKA; EARU ch 2, (a) 5+10km; (b) 5+25 km; (c) 5+45 km

V tabulkách číslo 8.5 a 8.6 jsou zobrazeny stavy EARU jednotek při délky trasy v pozici A: 15km a 20 km. Zde již lze pozorovat více než nadpoloviční nesestavní spojení mezi EARU jednotkou a OLT. Konkrétně v případě kombinace A:15 km činí 75 % stavů down, a u poslední kombinace bylo sestaveno spojení pouze u 8 % možných spojení, neboli 92 % všech hodnot bitové chybovosti bylo pod hraniční úrovní.

Tabulka 8.4: Kombinace trasy – A:15 km (vlevo); A:20 km (vpravo)

Optická trasa	1	2	12	24	31	32
15+5 km	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15+10 km	✗	✗	✗	✗	✓	✓
15+20 km	✗	✗	✗	✗	✓	✗
15+25 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗
15+30 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗
15+35 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Optická trasa	1	2	12	24	31	32
20+5 km	✗	✗	✗	✗	✓	✓
20+10 km	✗	✗	✗	✗	✗	✓
20+15 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗
20+20 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗
20+25 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗
20+30 km	✗	✗	✗	✗	✗	✗

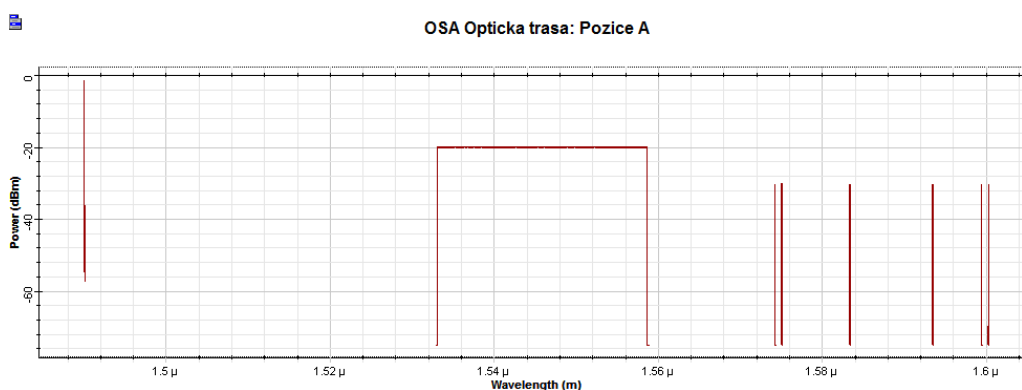


Obrázek 8.13: Diagram OKA; EARU ch 12, (a) 5+10km; (b) 10+5 km; (c) 15+5 km; (d) 20+5 km

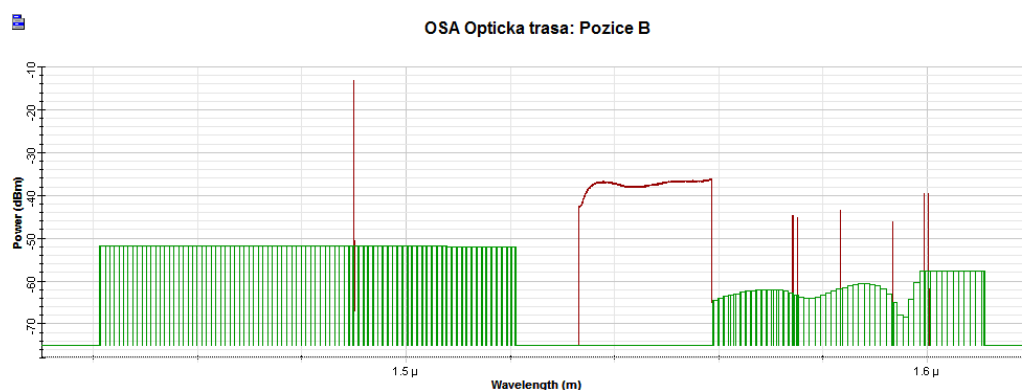
8.3 Spektrální charakteristiky v Optiwave Optisystem

Na obrázcích 8.14 až 8.16 jsou zobrazeny spektrální charakteristiky hybridní fotonické sítě realizované v simulačním prostředí Optiwave Optisystem, jenž zobrazují vstupní signál do oblasti zesilovačů, viz obr. 8.14 a následně výstup na pozici "B", viz 8.15. Zde lze zaznamenat ASE šum reprezentovaný zelenou barvou, který byl vygenerován SOA zesilovači při zesílení vstupního signálu.

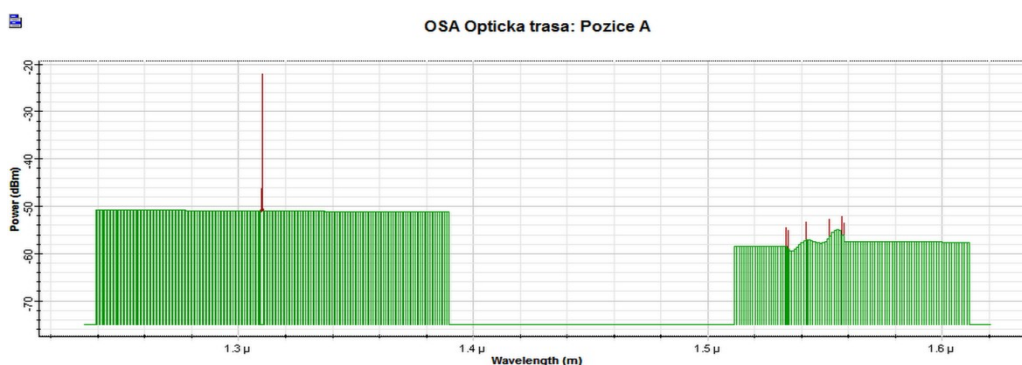
Na obrázku číslu 8.16 je pak uveden vzestupný signál na pozici "A", čili po zesílení a průchodu 5 km optického vlákna.



Obrázek 8.14: Sestupný směr; Pozice "A"



Obrázek 8.15: Sestupný směr; Pozice "B"; Kombinace 5+25 km



Obrázek 8.16: Vzestupný směr; Pozice "A"; Kombinace 5+25 km

Závěr

Hlavní cíl diplomové práce byl rozdělen do 4 dílčích cílů. První dílčí cíl měl za úkol provést studium hybridních fotonických sítí z dosud známých poznatků. Tento cíl byl splněn na základě studia literatury a seznámení se s danou problematikou.

Dalším cílem bylo vytvoření hybridní fotonické sítě v laboratoři pomocí dostupných prostředků. Hybridní síť byla tvořena dvěma odlišnými PON systémy pracujícími na principu časového multiplexu TDM, resp. vlnového multiplexu WDM, konkrétně hustého DWDM s roztečemi mezi jednotlivými nosnými 100 GHz. Základ vytvořené hybridní sítě byl položen na mé bakalářské práci zabývající se integrací těchto dvou různých PON systémů na jedno optické vlákno. Do této integrované sítě byly umístěny 4 polovodičové optické zesilovače SOA, což samo o sobě vedlo ke značným problémům. Neboť implementace SOA zesilovačů do komplexnějšího systému vedla k nepředpokládaným jevům. V rámci reálné aplikace bylo nutné zajistit vhodné pasivní prvky sloužící pro rozdělení všech 4 komunikačních pásem na samostatné optické vlákna, neboť umístění zesilovače na optické vlákno přenášející příspěvkové kanály v jiném pásmu než pro které je SOA zesilovač konstruován vedlo k degradování tohoto optického pásma. Tento problém byl vyřešen pomocí speciálních pásmových optických rozbočovačů, jenž byly sestaveny přesně dle požadovaných potřeb vycházející z vlnových délek jednotlivých PON systémů. Vzhledem k tomu, že původní požadavek byl separování jednotlivých přenosových pásem na samostatné větve, což bylo splněno, se projevil ve v sestupném směru velký přeslech na vlnové délce 1490 nm, což je kanál systému EPON2, na výstupu pásmového děliče, který byl konstruován na rozsah vlnových délek 1525–1640 nm. Na základě dodaných informací spolu s pásmovými děliči bylo zjištěno, že děliče jsou konstruovány s nízkými hranicemi izolace.

V rámci testování integrity hybridní fotonické sítě bylo zjištěno pomocí standardu ITU-T Y.1564, že hodnoty změřených parametrů dosahují stabilních hodnot bez ohledu na hodnotu výkonu špičky daného kanálu, dokud se nesníží hodnota OSNR pod danou hranici, když již není možné sestavit spojení. Případné zvýšení ztrátovosti rámců bylo způsobeno právě těmito hraničními hodnotami, kde spojení mezi OLT a EARU bylo bezprostředně před rozpadem. Co se týče systému EPON2, ze všech 24 kombinací optických tras byl zaznamenán pouze jeden případ, kdy ONU jednotka byla ve stavu UP. Ačkoliv v sestupném směru systém EPON2 vysílá mnohonásobně s větší výkonovou úrovní než je tomu u jednotlivých kanálů systému WDM-PON, tak úzké hrdlo omezující provoz bylo vytvořeno SOA zesilovačem SOA 1017S, jenž zesiluje O pásmo, vzestupný směr EPON2, a generuje velmi podstatnou hodnotu šumu, jenž v kombinaci shlukovitého režimu FP laseru umístěného v ONU jednotce s snížil hodnotu OSNR, tak razantně, že nemohlo dojít k sestavení spojení mezi ONU a OLT.

Další provedený test byl dle doporučení RFC 2544. Tento test vyžaduje stabilnější spojení než předchozí ITU-T Y.1654, což způsobilo, že v systému EPON2 nebylo možné uskutečnit testování. U WDM-PON již testování realizováno bylo, ač ne v takovém počtu jako u předcházejícího testu, ale dle výsledků, které byly téměř bez ohledu na kombinaci optické trasy konstantní, lze říci, že pokud byla linka stabilní po celou dobu testu, tak výsledné hodnoty jsou kvalitní.

Dalším cílem bylo vytvoření pomocí softwarové aplikace Optiwave OptiSystem hybridní fotonickou sítí založenou na reálných datech získaných z měření v laboratoři. V rámci řešení simulační

části byla využita naměřené data, např. hodnoty zisku jednotlivých SOA zesilovačů, či hodnoty měrného útlumu optických tras, jež tyto hodnoty lze přesně implementovat do jednotlivých prvků simulačního softwaru. Na základě změřených dat byla provedena simulace a následně pomocí diagramu oka a bitové chybovosti byly určeny při všech kombinacích optických tras stavby spojení mezi OLT a ONU jednotkami pomocí určení maximální hranice chybovosti.

Použitá literatura

- [1] ALLIED TELESIS INC. *AT ON-1000: Installation Guide*. 2006.
- [2] AN, F.-T., K.S. KIM, D. GUTIERREZ, S. YAM, E. HU, K. SHRIKHANDE a L.G. KAZOVSKY. SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture. *Journal of Lightwave Technology*. 2004, vol. 22, issue 11, s. 2557–2569. DOI: 10.1109/JLT.2004.836768.
- [3] BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications* (The Artech House Optoelectronics Library), Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- [4] ČECH, M. Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [5] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062
- [6] DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
- [7] FIBERXON. *SC Receptacle SFP GE-PON OLT Transceiver FTM-9712S-SL20(E)(G): (IEEE 802.3ahTM-2004 1000Base-PX20-D)*. Santa Clara, 2006. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/284375/SOURCE/FTM-9712S-SL20.html>
- [8] GROBE, Klaus a Michael EISELT. *Wavelength division multiplexing: a practical engineering guide*. First edition. Hoboken, New Jersey: Wiley-OSA, 2013, 1 online zdroj (430 pages). ISBN 978-1-118-75503-7.
- [9] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [10] LAM, Cedric. 2016. Fiber to the Home: Getting Beyond 10Gb/s. *Optics & Photonics News*. 2016, 22–29.
- [11] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [12] LEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications* (Selected Topics in Electronics and Systems). World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.
- [13] LG-NORTEL. *Ethernet Access 1100: System Description*. 4. vyd. Korea, 2010.
- [14] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [15] NEMOVA, G. *Optical Amplifiers* (Physics Research and Technology). Nova Biomedical Books, 2011. 337 s. ISBN 978-1612098357.
- [16] PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.

- [17] SHIMADA, S., Ishio, H. Optical Amplifiers and their Applications, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 p. ISBN 978-0471940050.
- [18] Survey of Next-Generation Optical Access System Concepts: WP4 “System concepts for Next Generation optical access networks”. D 4.1. OASE, 2010, 168 s. OASE_D4.1_WP4_EAB_210612_v3.0.doc.
- [19] TANAKA, K., A. AGATA, Y. HORIUCHI, S. YAM, E. HU, K. SHRIKHANDE a L.G. KAZOVSKY. IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture. *Journal of Lightwave Technology*. 2010, vol. 28, issue 4, s. 651–661. DOI: 10.1109/JLT.2009.2038722.
- [20] Wartak, M. (2013). Computational photonics: an introduction with MATLAB. (xiii, 452 pages). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [21] WILČEK, Zdeněk. 2014. *Měření a testování integrované vláknové optické sítě*. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [22] YENISTA OPTICS. 2015. *OSA20 Optical Spectrum Analyzer: User Manual*.
- [23] OSA20. 2012. *Yenista Optics* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <https://yenista.com/OSA20.html>
- [24] Hodnocení kvality videa IPTV: *Hodnocení kvality IPTV* [online]. 2014 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010050004>.
- [25] JAREŠ, Petr. Diagnostika přenosových systémů a sítí využívajících technologii Ethernet. In: [online]. Praha : České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/152.pdf.

Seznam příloh

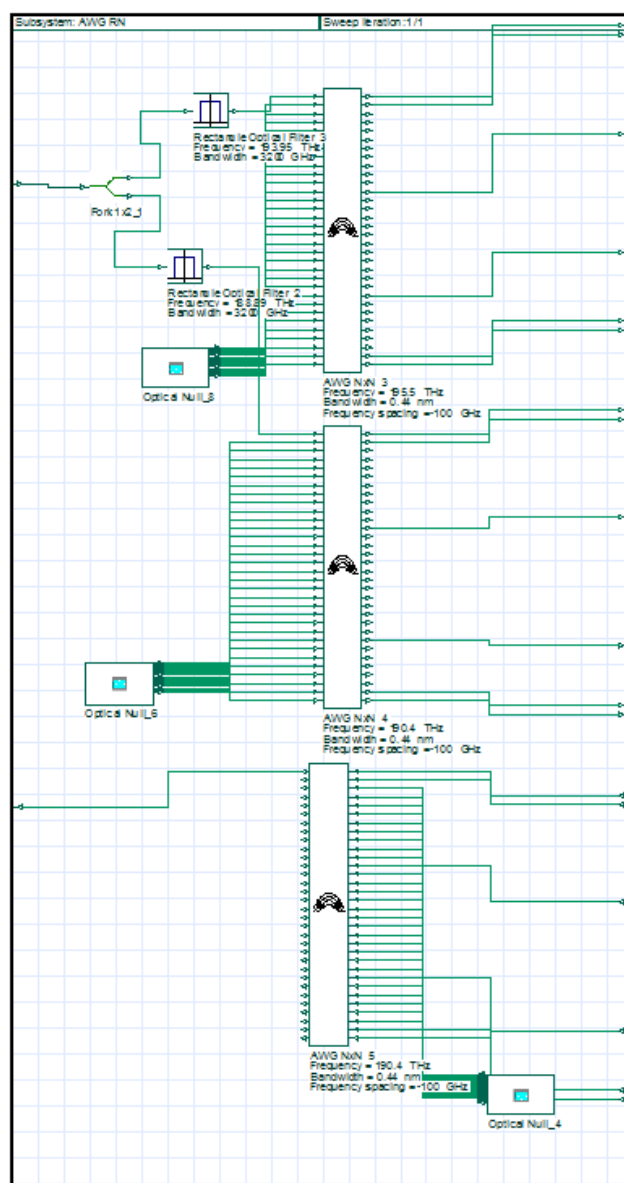
Příloha A:	AWG směrová odbočnice v RN	I
Příloha B:	ITU-T Y.1564 Konfigurační testy	ii
Příloha C:	Spektrální charakteristiky na výstupu hybridní sítě	iv
Příloha D:	RFC 2544	viii

Příloha na CD/DVD.

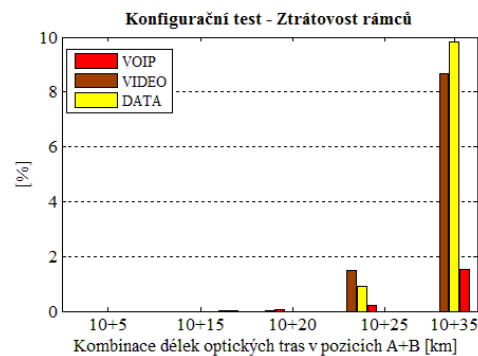
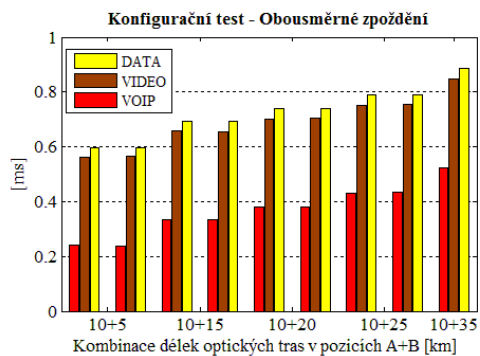
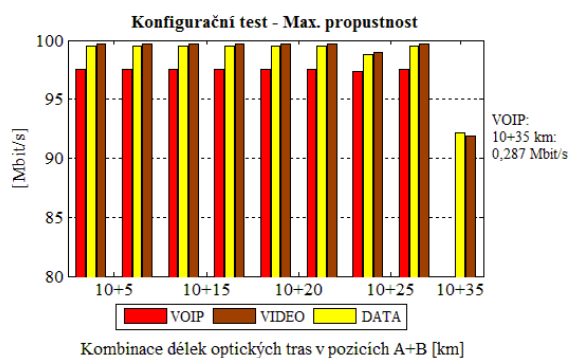
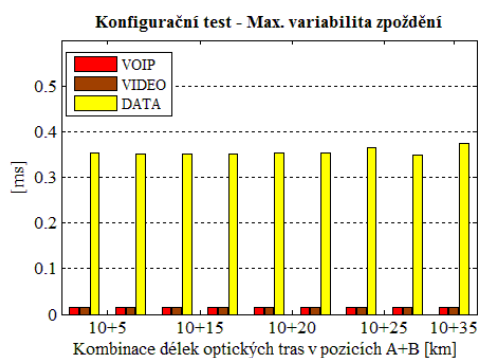
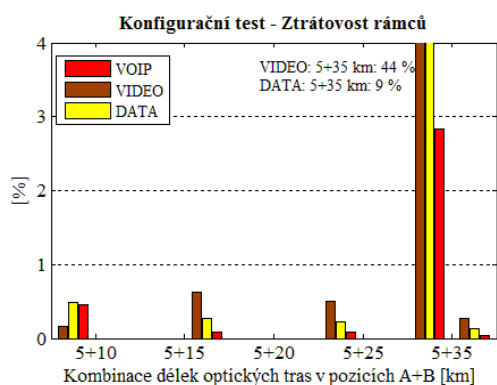
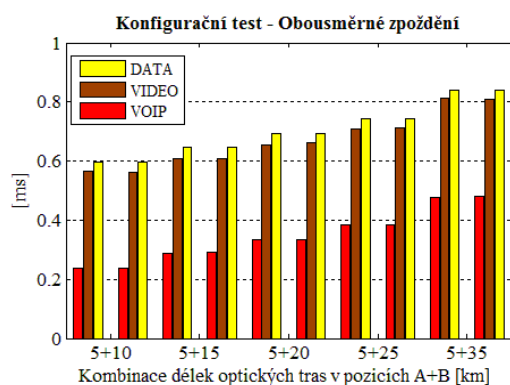
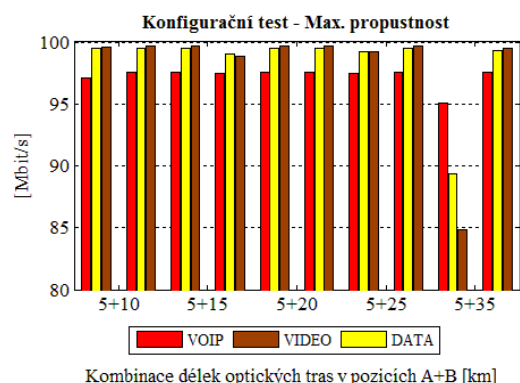
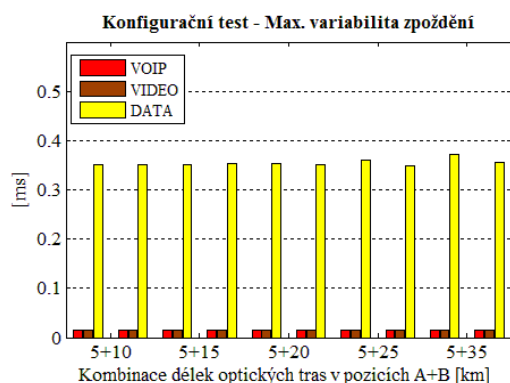
Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

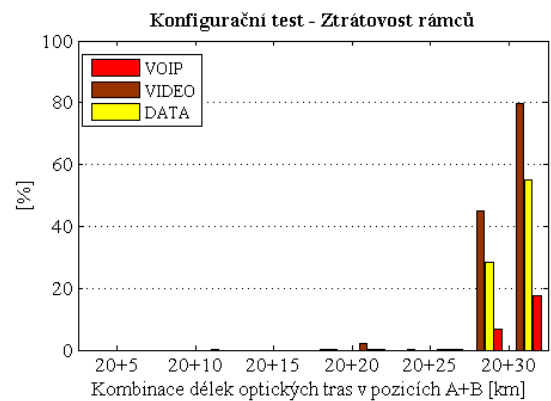
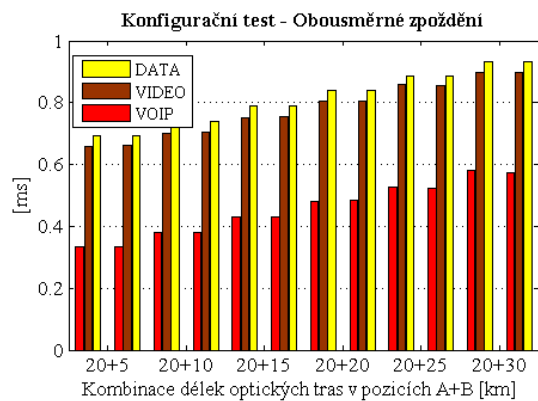
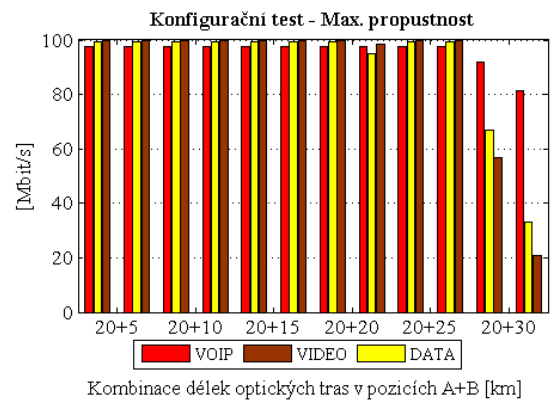
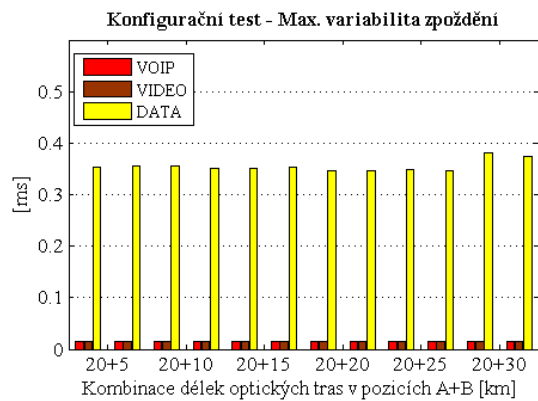
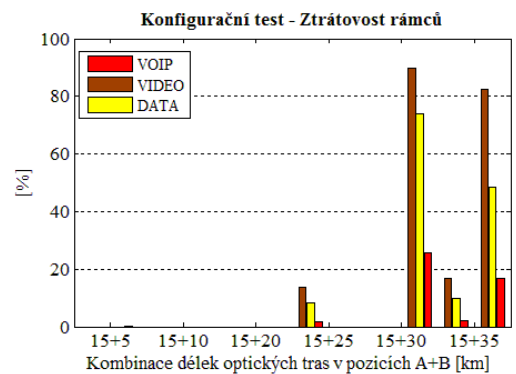
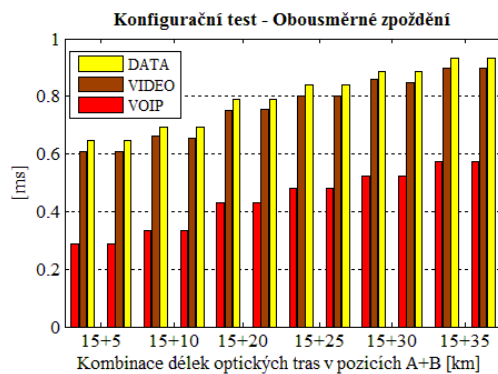
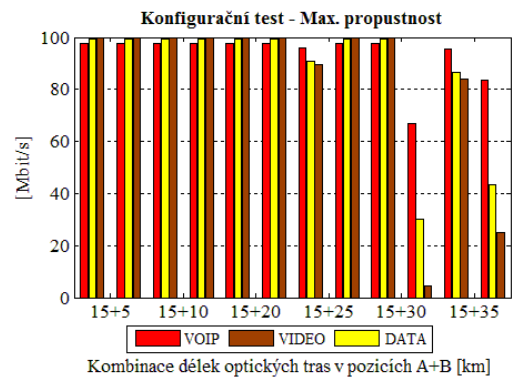
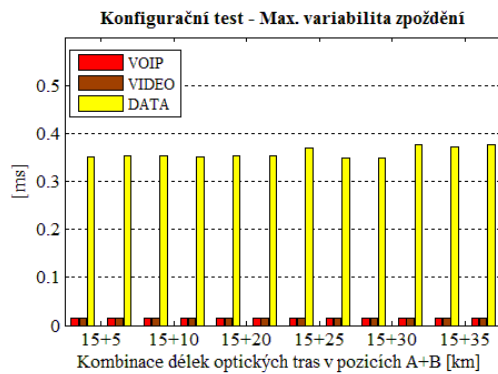
- 01_elektronicka_verze_DP
- 02_optiwave_optisystem
- 03_otdr
- 04_pmd
- 05_cd
- 06_itu_t_y_1564
- 07_rfc_2544
- 08_propojeni_laboratori
- 09_osa_integrita

Příloha A: *AWG směrová odbočnice v RN*

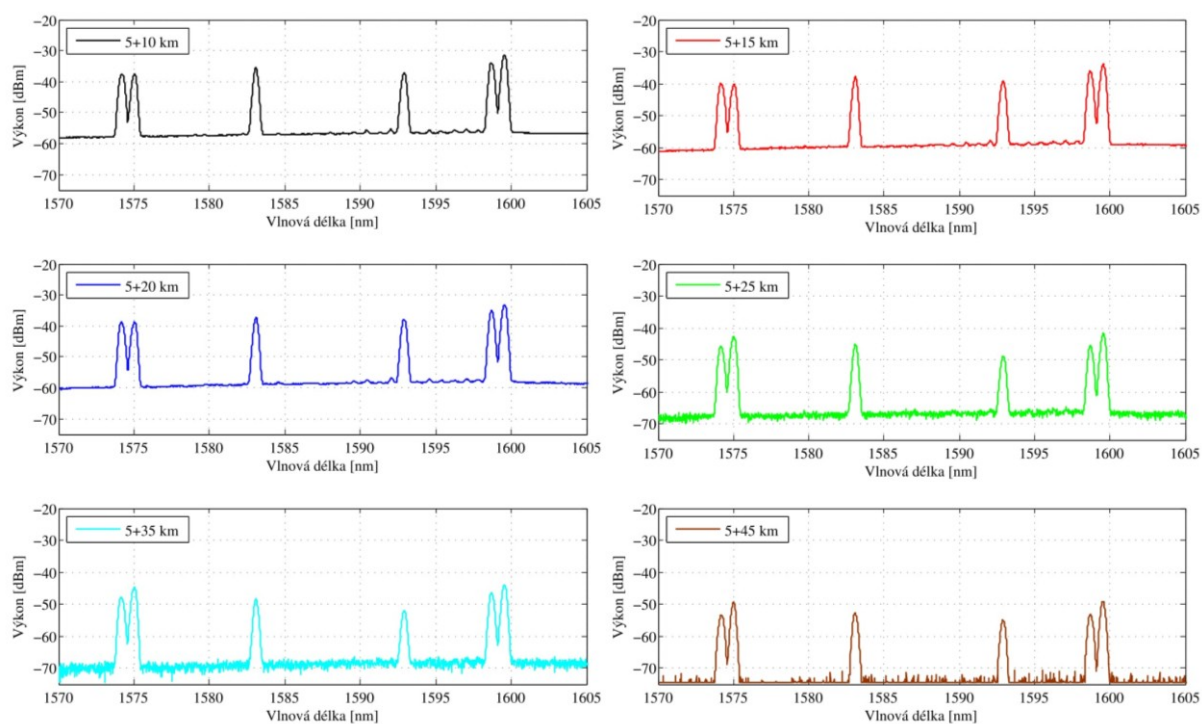


Příloha B: *ITU-T Y.1564 Konfigurační testy*

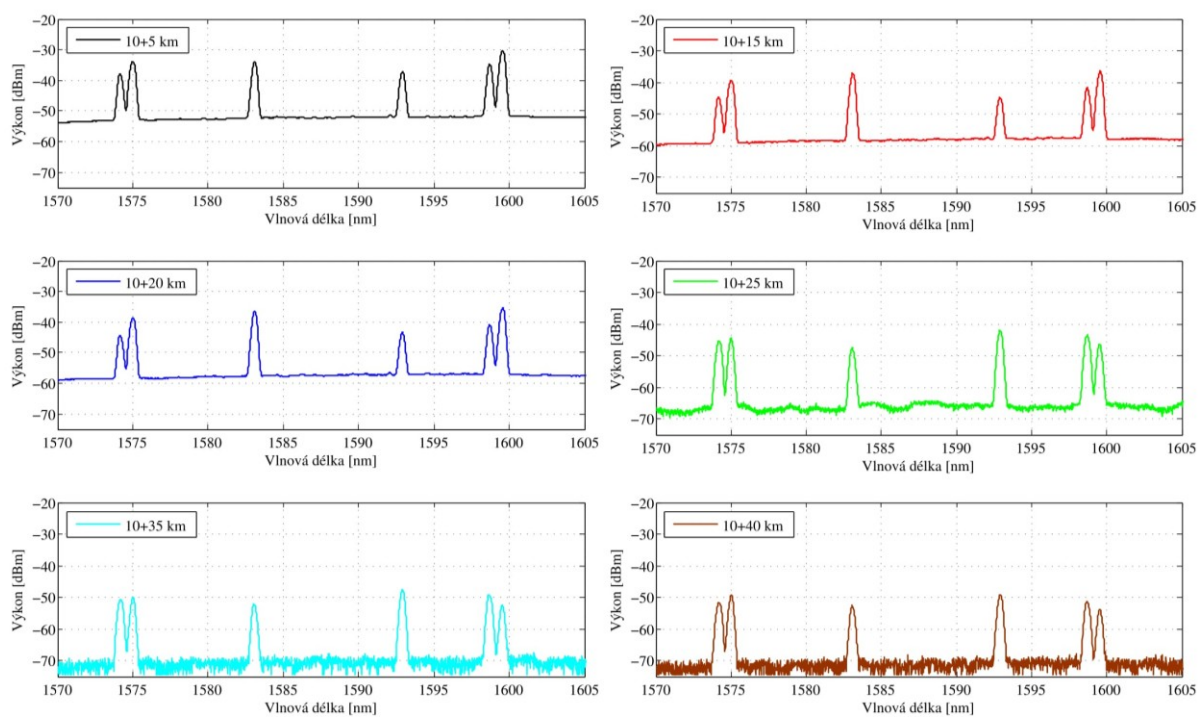




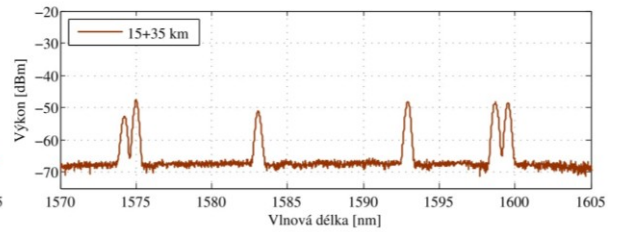
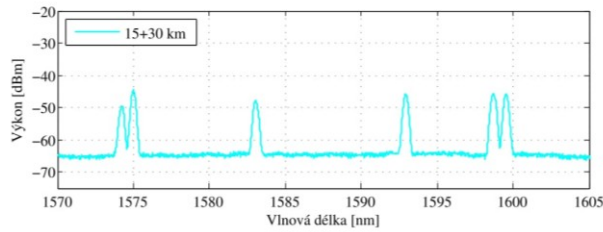
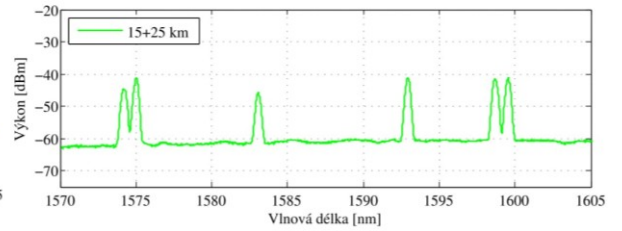
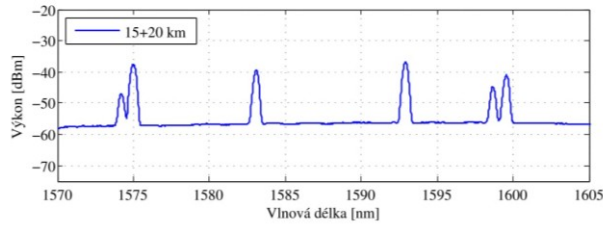
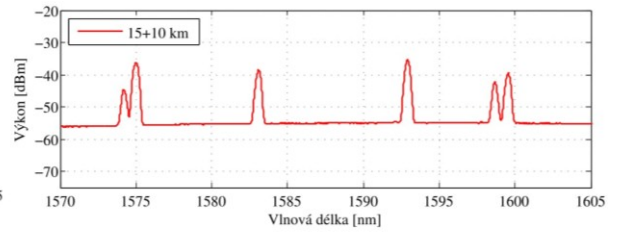
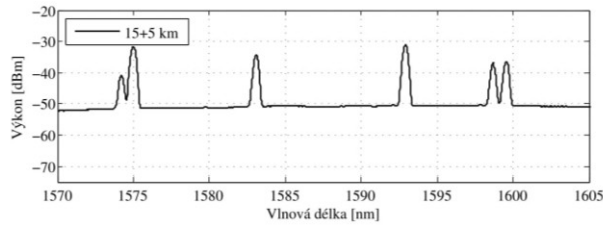
Příloha C: *Spektrální charakteristiky na výstupu hybridní sítě*



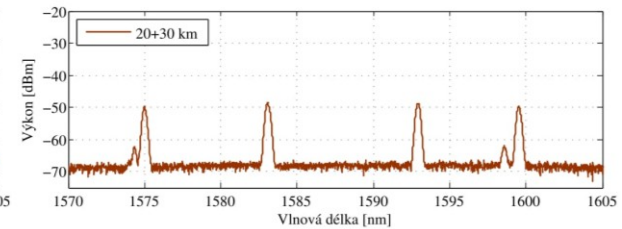
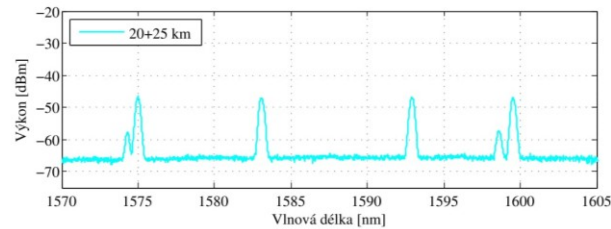
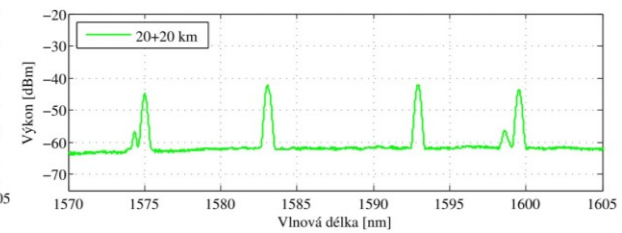
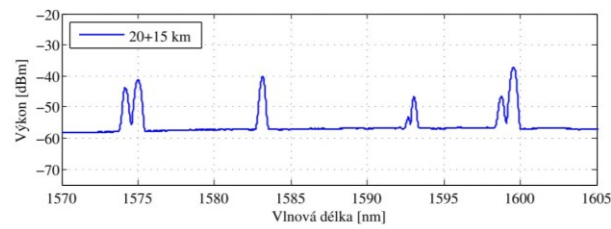
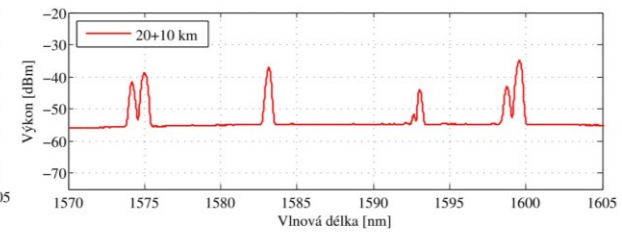
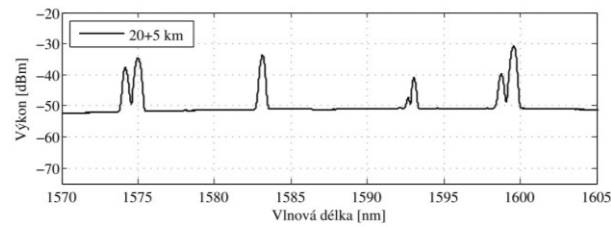
Sestupný směr, pozice A: 5 km



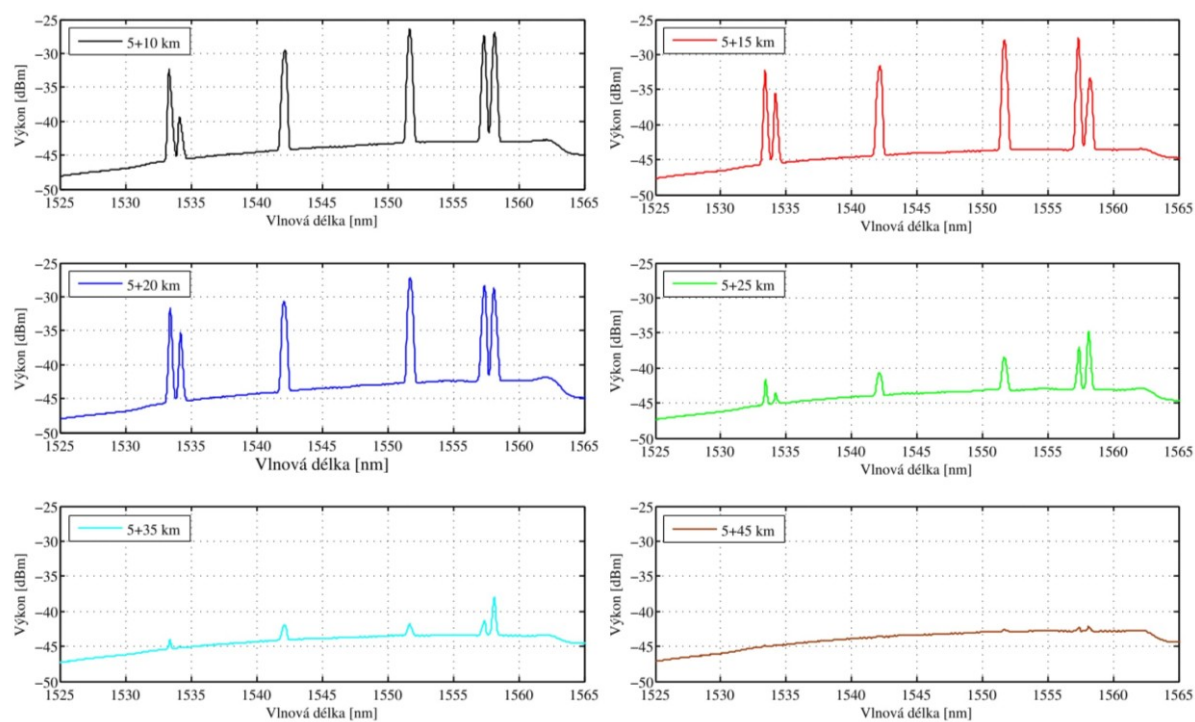
Sestupný směr, pozice A: 10 km



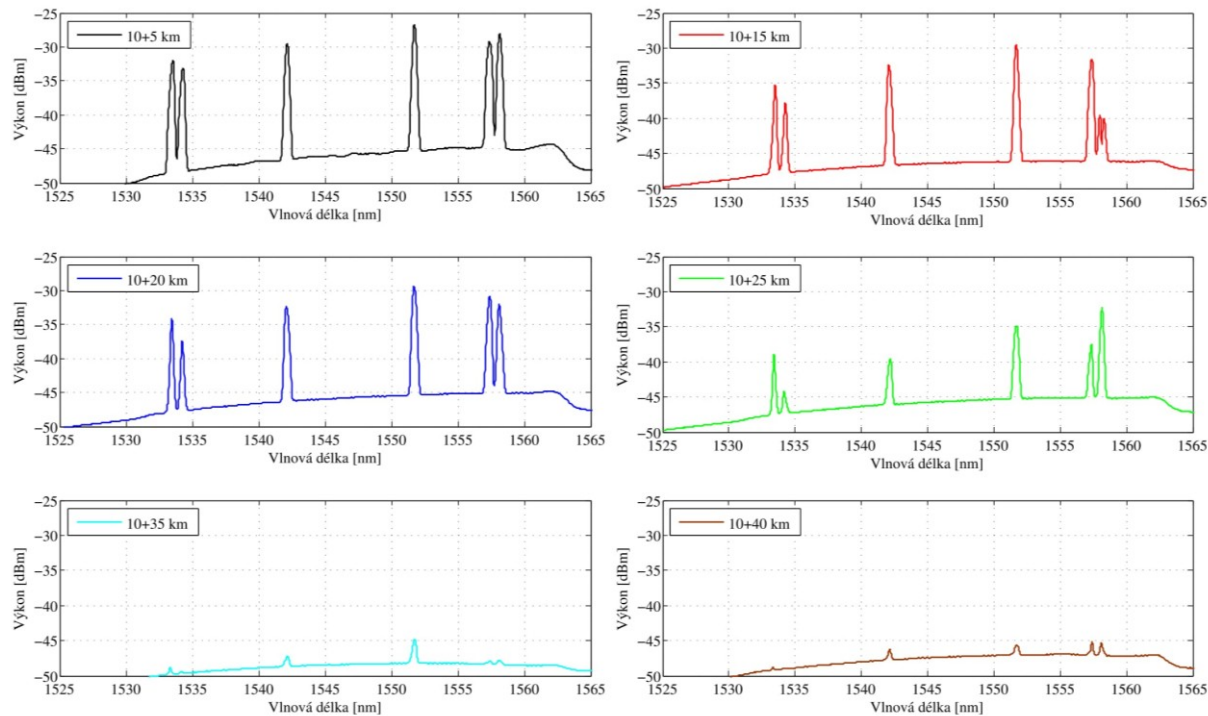
Sestupný směr, pozice A: 15 km



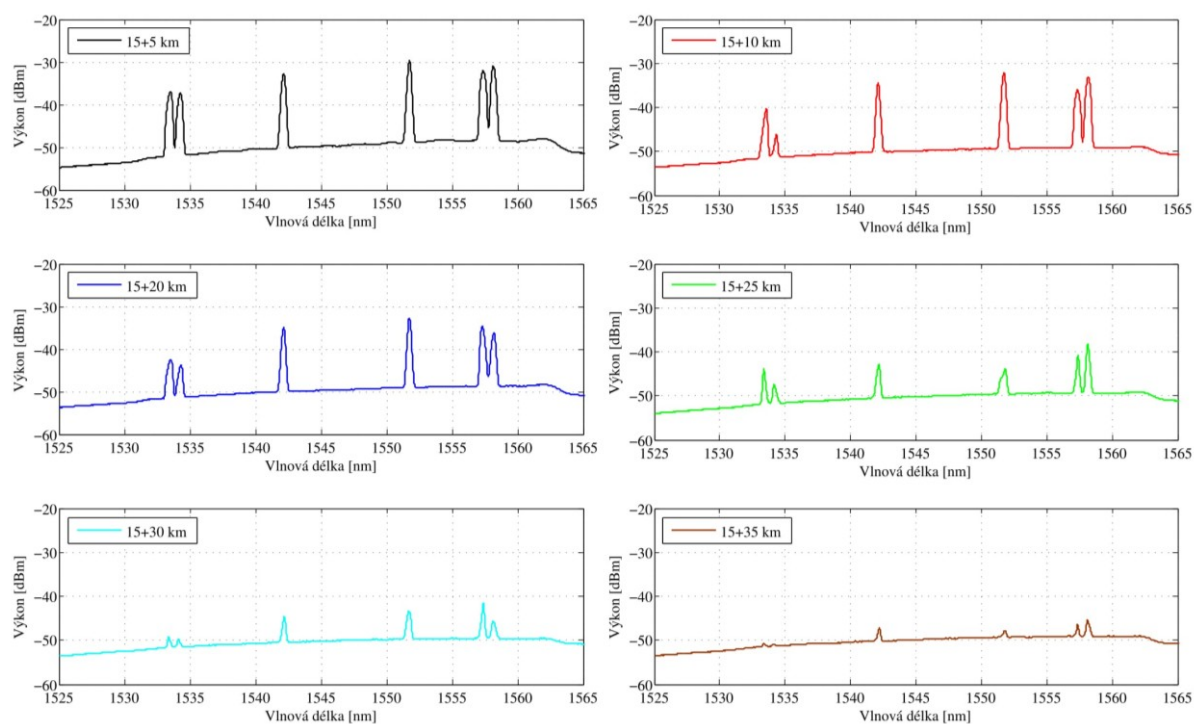
Sestupný směr, pozice A: 20 km



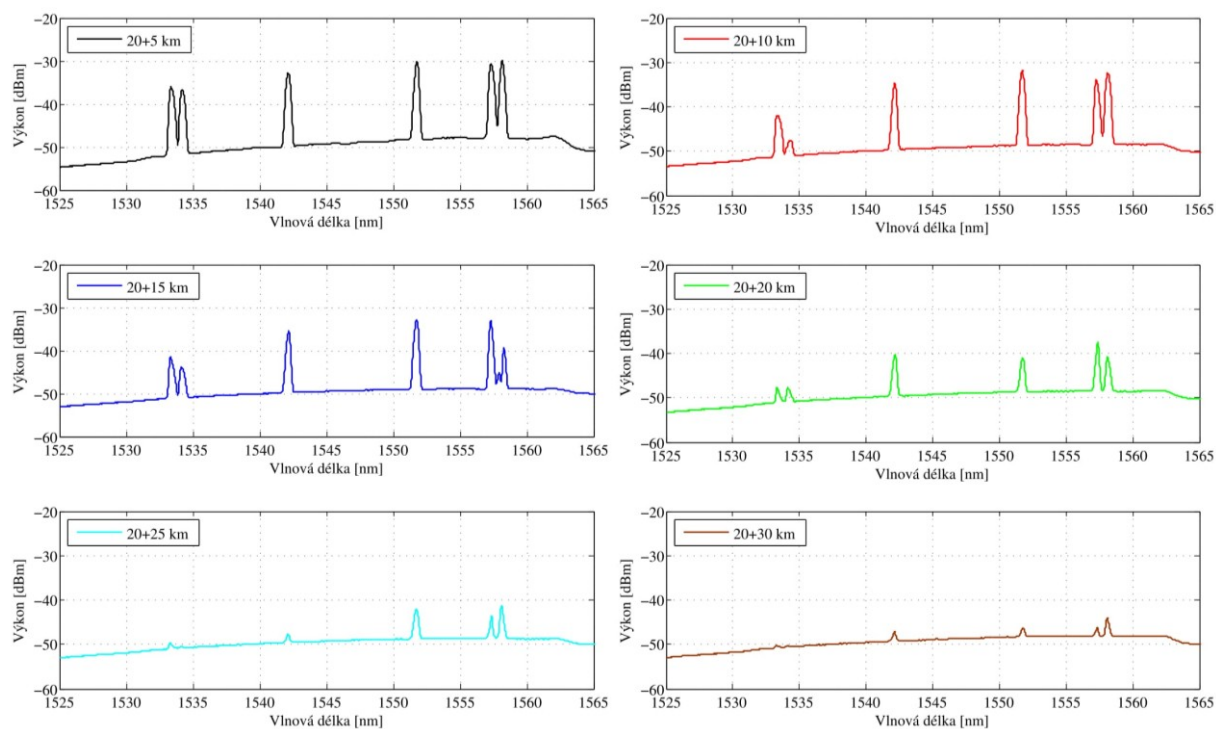
Vzestupný směr, WDM-PON, pozice A: 5 km



Vzestupný směr, WDM-PON, pozice A: 10 km



Vzestupný směr, WDM-PON, pozice A: 15 km



Vzestupný směr, WDM-PON, pozice A: 20 km

Příloha D: *RFC 2544*

Kombinace [km]	ZTRÁTOVOST RÁMCŮ UPSTREAM			ZTRÁTOVOST RÁMCŮ DOWNSTREAM			ZPOŽDĚNÍ		
Velikost rámců [B]	64	512	1518	64	512	1518	64	512	1518
5/10	4,423	0	0	4,492	0,426	0	0,1776	4,01127	3,03314
	4,522	0	0	100	0,426	0	0,17935	4,0105	-
5/20	4,422	0	0	100	0,426	0	-	4,10613	-
	4,423	0	0	4,495	0,426	0	0,27606	4,10587	1,82465
5/35	4,424	0,018	0,074	100	0,426	0	-	-	-
	4,423	0	0	4,501	0,426	0	0,42163	-	-
5/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,422	0	0	4,5	0,426	0	0,17899	-	3,0338
10/20	4,423	0	0	4,505	0,426	0	0,32307	4,15325	-
	4,422	0	0	100	0,426	0	0,32261	4,16883	3,17439
10/35	4,428	0,005	0,05	4,504	0,426	0	0,46649		
15/5	4,422	0	0	100	0,426	0	-	4,0592	-
	4,422	0	0	100	0,426	0	0,22986	-	-
15/20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,423	0	0	4,497	0,426	0	0,36896	-	-
15/30	4,422	0	0	4,5	0,426	0	0,46654	3	-
							-		
20/5	4,422	0	0	4,491	0,426	0	0,27487	-	3,12048
	4,423	0	0	4,502	0,426	0	0,27405	-	3,12028
20/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,424	0	0	4,494	0,426	0	0,37235	-	3,22269